

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

С.М. Нубарян

Контрольно-измерительные приборы в теплотехнических измерениях

(Курс лекций для студентов специальности
7.092108 – «Теплогазоснабжение и вентиляция»)

ХАРЬКОВ – ХНАГХ – 2006

Нубарян С.М. Контрольно-измерительные приборы в теплотехнических измерениях. Курс лекций. – Харьков: ХНАГХ, 2006 – 283 с.

В курсе лекций изложены основные сведения о методах измерения и приборах, предназначенных для контроля основных технологических параметров, используемых при контроле и управлении объектов энергетики и коммунального хозяйства.

Данный курс предназначен для студентов специальности 7.092108 ТГВ.

Автор выражает благодарность всем сотрудникам кафедры ЭГТС Харьковской национальной академии городского хозяйства, оказавшим техническую помощь при подготовке настоящего издания к печати.

Рекомендована кафедрой эксплуатации газовых и тепловых систем протокол №7 от 29.07.06.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Капцов

© Нубарян С.М., ХНАГХ, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение	6
1. Общие сведения об измерениях и измерительной технике.....	7
1.1. Основные понятия и определения.....	7
1.2. Виды и методы измерений.....	10
1.3. Погрешности измерений.....	11
1.4. Обработка результатов измерений.....	15
1.5. Классы точности средств измерений.....	18
1.6. Статические и динамические характеристики.....	21
2. Измерение температур.....	28
2.1. Температура и температурные шкалы.....	28
2.2. Термометры, работающие на принципах расширения и изменения давления рабочего вещества.....	32
2.2.1. Термометры стеклянные жидкостные.....	32
2.2.2. Манометрические термометры.....	40
2.2.3. Дилатометрические и биметаллические термометры.....	43
2.3. Поверка термометров расширения.....	47
2.4. Термоэлектрический метод измерения температур.....	52
2.4.1. Теоретические основы термопар.....	52
2.4.2. Определение термо-э.д.с. термопар из различных материалов.....	57
2.4.3. Стандартные промышленные термопары.....	60
2.4.4. Устройство термоэлектрических термометров.....	62
2.5. Измерительные приборы, применяемые с термопарами.....	68
2.5.1. Милливольтметры.....	69
2.5.2. Компенсационный метод измерения термо-э.д.с.....	73
2.5.3. Автоматические потенциометры.....	76
2.6. Электрические термометры сопротивления.....	80
2.6.1. Основные сведения.....	80

2.6.2. Материалы, используемые в термометрах сопротивления	81
2.6.3. Устройство металлических термометров сопротивления.....	87
2.7. Приборы, применяемые с термометрами сопротивления.....	91
2.7.1. Компенсационный метод измерения сопротивления.....	91
2.7.2. Уравновешенные мосты.....	93
2.7.3. Неуравновешенные мосты.....	96
2.7.4. Логометры.....	98
2.7.5. Автоматические уравновешенные мосты.....	101
2.8. Методика контактного измерения температуры.....	104
3. Измерение давления и его перепадов.....	118
3.1. Общие сведения и единицы измерения давления.....	118
3.2. Классификация средств измерения давления.....	123
3.3. Жидкостные приборы давления.....	127
3.3.1. Манометры U- образные и чашечные.....	127
3.3.2. Барометры ртутные.....	134
3.4. Приборы давления с упругими чувствительными элементами.....	136
3.4.1. Упругие чувствительные элементы.....	140
3.4.2. Приборы давления прямого действия.....	147
3.4.3. Электроконтактные приборы давления.....	154
3.4.4. Приборы давления с преобразователями.....	157
3.4.5. Приборы давления электрические.....	162
3.5. Грузопоршневые манометры.....	170
3.6. Дифференциальные манометры.....	173
3.6.1. Колокольные дифманометры.....	175
3.6.2. Дифманометры кольцевые.....	178
3.6.3. Поплавковые дифманометры.....	181
3.6.4. Дифманометры с упругими чувствительными элементами..	186
3.7. Установка и использование приборов давления.....	200

4. Измерение расходов сред и количества тепла.....	206
4.1. Измерение скоростей и расходов напорными трубками.....	209
4.2. Измерение расхода при помощи сужающих устройств.....	213
4.2.1. Основы теории.....	213
4.2.2. Характеристики стандартных сужающих устройств.....	217
4.2.3. Коэффициенты расхода и поправочные множители к ним..	221
4.2.4. Основные требования к сужающим устройствам.....	225
4.3. Расходомеры постоянного перепада давления.....	229
4.3.1. Основные положения теории ротаметров.....	231
4.3.2. Устройство ротаметров.....	233
4.4. Тахометрические расходомеры и счетчики.....	236
4.5. Электромагнитные расходомеры.....	246
4.6. Ультразвуковые расходомеры.....	250
4.7 Измерение количества и расхода тепла.....	253
5. Контроль и измерение уровней.....	260
5.1. Уровнемеры поплавковые и буйковые.....	261
5.2. Акустические и ультразвуковые уровнемеры.....	265
5.3. Емкостные уровнемеры.....	270
5.4. Уровнемеры дифманометрические.....	274
Список литературы.....	282

ВВЕДЕНИЕ

Развитие науки и техники тесно связано с применением средств измерения. Измерения, как процесс, являются одним из способов познания природы, помогают осуществлять научные открытия и внедрять их в производство и технику.

Измерения представляют огромное значение и как единственное средство контроля технологических процессов в системах теплогазоснабжения и энергетики в целом. Правильно организованные измерения обеспечивают надежность, экономичность и удобство ведения производственных процессов, а также дают возможность их широкой автоматизации. Кроме того, без применения контрольно-измерительных приборов отсутствует возможность осуществления безопасного и безаварийного ведения производственных процессов и работы установок.

На сегодняшний день народное хозяйство страны обеспечено громадным арсеналом средств измерения как отечественного, так и иностранного производства - от простейших первичных преобразователей и приборов до сложных автоматических приборов и систем, позволяющих проводить контроль технологических установок и сложных производств с применением средств информационно-вычислительной техники.

Большое разнообразие средств измерения требует правильного их выбора для определенных целей. В этой связи одним из важных вопросов является вопрос их метрологического обеспечения. Помимо этого, необходимо уделять внимание экономической стороне вопроса, а также унификации средств измерения и условий их эксплуатации. Для этих целей создана и функционирует Государственная система приборов (ГСП), позволяющая максимально стандартизировать и унифицировать измерительные средства для промышленного применения.

Научно-технический прогресс и появление новых технологий ставят новые задачи перед развитием техники измерений. Это требует дальнейшего совершенствования методов и средств измерения, повышения их качества, надежности и снижения себестоимости.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

1.1. Основные понятия и определения

Измерение - это нахождение значения некоторой физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Средства измерений - это технические средства, которые имеют нормированные метрологические характеристики. При этом значение физической величины, отсчитываемое по отсчетному устройству средства измерения, строго соответствует определенному количеству физических единиц, принятых в качестве единиц измерения. К средствам измерения относятся:

- мера;
- измерительные приборы;
- измерительные преобразователи;
- измерительные системы;
- установки, комплексы.

Мера - это эталонное средство измерения, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера или количества. Меры могут быть однозначными и многозначными. Так, например, в электротехнических измерениях к однозначным мерам относятся катушки индуктивности, сопротивления, нормальные элементы и др.; к многозначным - магазины сопротивлений, конденсаторы переменной емкости, калибраторы напряжения и тока и др.

Измерительный прибор - средство измерений, предназначенное для выдачи количественной информации об измеряемой величине в доступной для восприятия форме.

По способу отсчета значений измеряемой величины измерительные приборы делятся на аналоговые и цифровые. В аналоговых измерительных приборах значение измеряемой величины определяется непосредственно по

шкале со стрелкой или другими указателями. В цифровых измерительных приборах значение измеряемой величины определяется по цифровому индикатору прибора.

Измерительные приборы подразделяют на показывающие и регистрирующие. Показывающие измерительные приборы предназначены для отсчитывания результата измерений в аналоговой или цифровой форме, регистрирующие - для регистрации (записи или печати) результатов измерения.

Измерительный преобразователь – средство измерения, предназначаемое для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поступающей непосредственно на восприятие. К измерительным преобразователям относятся датчики (сенсоры), нормирующие и масштабирующие устройства, усилители и др.

Датчик – первичный измерительный преобразователь, предназначенный для непосредственного восприятия воздействия измеряемой величины.

По своему метрологическому назначению средства измерений делятся на эталонные, образцовые и рабочие.

Рабочие средства измерений применяются для повседневных измерений в промышленных и лабораторных условиях, не связанных с передачей измерительных мер.

Образцовые средства измерений предназначены для передачи измерительных мер от эталонов к рабочим средствам измерения, то есть служат для их поверки.

Эталон - средство измерений, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы физической величины для передачи ее размера средствам измерения более низкого ранга, чем указанные выше.

Измерительные приборы можно классифицировать по принципу действия, по способу представления информации и функциональному назначению. Общая классификация средств измерения приведена на рис. 1.1.

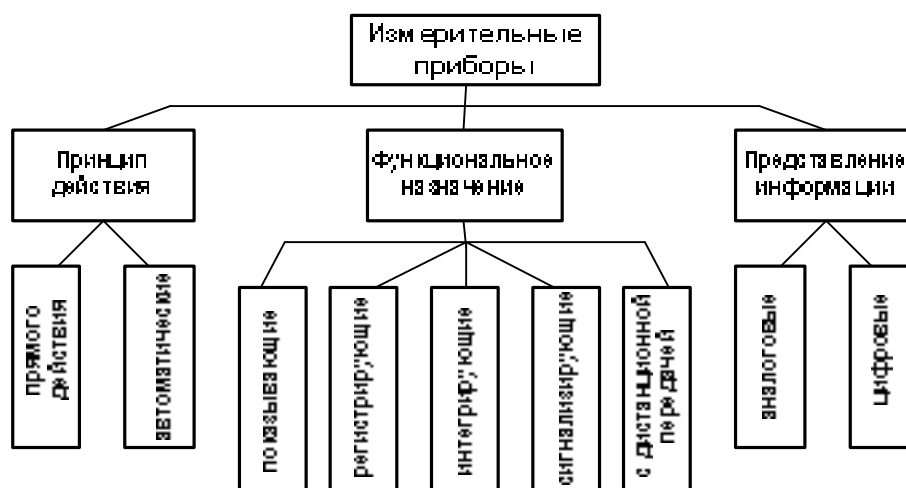


Рис. 1.1 – Классификация средств измерения

Важным аспектом в системах измерения является унификация входных и выходных сигналов элементов, входящих в систему. Это позволяет обеспечить взаимозаменяемость элементов измерительных устройств и сократить их разновидность, а также использовать вычислительные комплексы в системах измерения.

Создание унифицированных и стандартизированных средств измерения предусматривается Государственной системой промышленных приборов (ГСП), которая использует блочно-модульный принцип и имеет три ветви, объединяющие приборы с пневматическими, электрическими и частотными сигналами.

Пневматическая ветвь – уровни входных и выходных сигналов составляют (0,02 – 0,1 МПа); *электрическая ветвь* с сигналами *постоянного тока* - (0 -5 мА, 4 – 20 мА, 0 – 10 в); *электрическая ветвь переменного тока* с *частотными сигналами* – (1500 – 2500 Гц, 4000- 8000 Гц).

1.2. Виды и методы измерений

В зависимости от получения результата непосредственно в процессе измерения или после измерения путем последующих расчетов различают прямые, косвенные и совокупные измерения.

Прямые измерения - измерения, при которых искомое значение физической величины определяется непосредственно из опытных данных. Например, определение значения температуры при помощи термометра, тока, протекающего в цепи, при помощи амперметра и т.д.

Косвенные измерения - измерения, при которых измеряется не сама физическая величина, а величина, функционально связанная с ней. Измеряемая величина при косвенных измерениях определяется на основе прямых измерений величин, функционально связанных с измеряемой, с последующим расчетом на основе известной функциональной зависимости. Например, измерение мощности постоянного тока при помощи амперметра и вольтметра с последующим расчетом мощности по известной зависимости $P = U \cdot I$ или расхода по перепаду давления на сужающем устройстве по зависимости

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}} \text{ и т.д.}$$

Совокупные измерения - одновременные измерения нескольких однородных величин, на основании которых находят значения искомой величины.

Сущность измерения физических величин измерительными приборами заключается в сравнении (сопоставлении) их с однородной физической величиной, принятой за единицу измерения. И прежде чем производить измерения, необходимо в зависимости от требуемой точности и от наличия измерительных приборов выбрать соответствующий метод измерения.

Метод измерения - совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Измерения производятся одним из двух методов: непосредственной оценки или сравнения с мерой.

При использовании метода *непосредственной оценки* значение искомой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора. Пример такого метода - измерение давления манометром, температуры - термометром, тока - амперметром и т.д.

Метод *сравнения с мерой* - метод измерения, при котором измеряемую искомую величину сравнивают с однородной величиной, воспроизводимой мерой.

Данный метод имеет ряд разновидностей: дифференциальный (разностный) метод, нулевой метод, метод замещения (компенсационный).

При дифференциальном методе на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой и образцовой величинами, воспроизводимой мерой. Чем меньше разность, тем точнее результат. Предельным случаем дифференциального метода является нулевой метод, при котором разность доводится до нуля.

При использовании метода замещения измеряемая величина замещается известной величиной, воспроизводимой мерой. При этом замещение измеряемой величины производят так, что показания прибора будут одинаковы в обоих случаях, т.е. никаких измерений в принципе не происходит.

1.3. Погрешности измерений

Результат измерений физической величины всегда отличается от истинного значения на некоторую величину, которая называется погрешностью. Классификация погрешностей в зависимости от источника возникновения, условий проведения измерений, характера проявления измеряемой величины во времени и способа ее выражения приведена на рис.1.2.

Погрешность метода обуславливается несовершенством метода и приемов использования средств измерений. Например, при определении

мощности постоянного тока по показаниям амперметра и вольтметра без учета мощности, потребляемой указанными приборами, возникает методическая погрешность.

Инструментальная погрешность обуславливается погрешностью изготовления примененных средств измерений (неточности при изготовлении приборов, повышенные зазоры, люфты), неточность градуировки и т.д.



Рис.1.2 - Классификация погрешностей

Субъективная погрешность обуславливается несовершенством органов чувств оператора.

Основная погрешность - погрешность, возникающая в нормальных условиях эксплуатации средства измерения (температура, влажность, напряжение питания и др.), которые нормируются и указываются в стандартах или технических условиях.

Дополнительная погрешность обуславливается отклонением одной или нескольких влияющих величин от нормального значения. Например, изменение температуры окружающей среды, изменение влажности, колебания напряжения питающей сети. Значение дополнительной погрешности нормируется и указывается в технической документации на средства измерения.

Дополнительная погрешность от воздействия влияющей величины – это изменение оцененной статической функции преобразования (статической характеристики средства измерения), которое вызвано отклонением одной из влияющих величин от установленного при нормальных условиях номинального значения или номинального диапазона, причем все другие влияющие величины сохраняют свое номинальное значение или свой номинальный диапазон.

Систематическая погрешность - постоянная или закономерно изменяющаяся погрешность средства измерения при повторных измерениях одной и той же величины в одинаковых условиях измерения. Например, погрешность, возникающая при измерении сопротивления ампервольтметром, обусловленная разрядом батареи питания.

Систематическая составляющая основной погрешности при одном и том же значении информативного параметра входного сигнала в неизменных условиях применения остается постоянной или изменяется настолько медленно, что ее изменениями за время измерения можно пренебречь, или изменяется по определенному закону, что дает возможность ее учета.

Случайная погрешность - погрешность измерения, характер изменения которой при повторных измерениях одной и той же величины в одинаковых условиях случайный. Случайную погрешность возможно определить только с использованием методов статистического анализа для многократных измерений различных значений измеряемой величины.

Грубая погрешность (промах) - погрешность измерения, которая существенно превышает ожидаемую в данных измерениях.

Статическая погрешность - погрешность при измерении постоянной по времени величины. Например, погрешность измерения неизменных за время измерения температуры, давления и т.д.

Динамическая погрешность - погрешность измерения изменяющейся во времени величины. Например, погрешность измерения, возникающая в момент подключения измерительного прибора или различных коммутаций в технологических процессах, обусловленная переходными процессами при коммутации, которая зависит от быстродействия измерительного прибора.

Абсолютная погрешность измерения Δ - разность между результатом измерения X и истинным значением измеряемой величины X_0 :

$$\Delta = X - X_0. \quad (1.1)$$

Абсолютная погрешность выражается в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность измерения δ - отношение абсолютной погрешности измерения Δ к истинному значению измеряемой величины X_0 :

$$\delta = \frac{\Delta}{X_0} = \frac{X - X_0}{X_0} \cdot 100\%. \quad (1.2)$$

Относительная погрешность - безразмерная величина.

Поскольку истинное значение измеряемой величины X_0 неизвестно, то практически используют действительное значение измеряемой величины X_d , при этом принимается $X_0 = X_d$.

Действительное значение X_d находят экспериментально, путем применения более точных методов и средств измерений. Обычно за действительное значение принимают показания образцовых средств измерения.

Приведенная погрешность измерения γ - это отношение абсолютной погрешности Δ к некоторому нормирующему значению измеряемой величины X_N .

Нормирующее значение X_N - это установленное значение ширины диапазона или определенное значение, к которому относится выражение

значения характеристики. Приведенная погрешность на всем диапазоне средства измерения определяется по выражению:

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot 100 \% , \quad (1.3)$$

где X_{\max} и X_{\min} – верхняя и нижняя границы диапазона измерения, соответственно.

При логарифмическом, гиперболическом и степенном характере шкалы прибора приведенную погрешность выражают в процентах от длины шкалы.

1.4. Обработка результатов измерений

Результат измерения, под которым понимают значение искомой величины, определенное при помощи средств измерения, получают после соответственной обработки результатов наблюдений.

- Определяют систематическую составляющую погрешности и исключают промахи. Систематическую составляющую исключают путем введения поправки $\Delta\Pi$. Значение поправки равно абсолютной систематической погрешности Δ , взятой с противоположным знаком:

$$\Delta\Pi = - \Delta. \quad (1.4)$$

С учетом поправки результат измерения принимает значение:

$$X = X_{\text{д}} + \Delta\Pi. \quad (1.5)$$

- Определяют случайную составляющую погрешности, влияние которой можно уменьшить многократным повторением одного и того же измерения в одинаковых условиях (с последующей обработкой результатов методами математической статистики).

Так как вероятность появления положительных и отрицательных случайных погрешностей одинакова, то за результат измерений при достаточно большом их количестве принимают среднее арифметическое $X_{\text{ср}}$ из всех

полученных результатов $X_1, X_2, X_3 \dots X_N$, определяемое по следующему выражению:

$$X_{CP} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_N}{N} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N X_i, \quad (1.6)$$

где N - количество измерений.

Среднее значение измеряемой величины X_{CP} соответствует ее математическому ожиданию M_X .

Разброс значений измеряемой величины около ее среднего значения в каждой точке измерения характеризуется дисперсией случайной величины D_X или среднеквадратичным отклонением σ_X , определяемые по следующим формулам:

$$D_X = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (X_i - X_{CP})^2, \quad (1.7)$$

$$\sigma_X = \sqrt{D_X}. \quad (1.8)$$

При этом максимальная случайная погрешность равна $\pm 3 \sigma_X$:

С учетом систематической и случайной составляющих погрешности границы возможных значений измеряемой величины определяются следующими выражениями:

$$X = X_{CP} \pm (\Delta + 2 \sigma_X) - \text{с вероятностью } 95,0\%. \quad (1.9)$$

$$X = X_{CP} \pm (\Delta + 3 \sigma_X) - \text{с вероятностью } 99,7\%. \quad (1.10)$$

При обработке результатов косвенных измерений, если искомая измеряемая величина X равна произведению нескольких величин, измеренных прямым методом:

$$X = A^K \cdot B^L \cdot C^M,$$

где K, L, M - постоянные числа;

A, B, C – измеряемые величины,

то предельная относительная погрешность косвенного измерения определяется следующим выражением:

$$\delta X = |K \cdot \delta A| + |L \cdot \delta B| + |M \cdot \delta C| + \dots \quad (1.11)$$

Например, при определении мощности электрического тока по известной формуле $P = I^2 \cdot R$, где I – сила тока в электрической цепи, R – величина омического сопротивления цепи, а в соответствии с выражением (1.11) $P = X$; $I = A$; $R = B$; $K=2$; $L=1$, то общая относительная погрешность косвенного измерения составит:

$$\delta P = 2 \delta I + \delta R \quad (\%).$$

При обработке косвенных измерений, если измеряемая величина X равна сумме (разности) нескольких однородных величин $X=X_1 \pm X_2 \pm \dots$, предельная относительная погрешность определяется выражением:

$$\delta X = \frac{|X_1 \cdot \delta_1| + |X_2 \cdot \delta_2| + \dots + |X_N \cdot \delta_N|}{N}, \quad (1.12)$$

где N – количество измеряемых величин.

В результате обработки результатов наблюдений получают числовое значение измеряемой искомой величины. Полученное значение погрешности измерения позволяет оценить числовые значения, которые являются достоверными.

Существуют следующие правила представления результатов обработки:

1. В значении погрешности удерживается не более двух значащих цифр, причем последняя цифра округляется обычно до нуля или пяти.
2. Числовое значение результата измерений должно оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности. Например, $235,732 \pm 0,15$ округляется до $235,73 \pm 0,15$.
3. Если первая из отбрасываемых цифр меньше пяти, то остающиеся цифры не изменяются. Например, $442,741 \pm 0,4$ округляется до $442,7 \pm 0,4$.
4. Если первая из отбрасываемых цифр больше или равна пяти и за ней следует значащая цифра, то последняя остающаяся цифра увеличивается на единицу. Например, $37,268 \pm 0,5$ округляется до $37,3 \pm 0,5$; $37,252 \pm 0,5$ округляется до $37,3 \pm 0,5$.
5. Если первая из отбрасываемых цифр равна пяти и за ней не следует значащих цифр, то округление производится до ближайшего четного.

Например, $21,35 \pm 0,2$ округляется до $21,4 \pm 0,2$; $21,45 \pm 0,2$ округляется до $21,4 \pm 0,2$; $21,55 \pm 0,2$ округляется до $21,6 \pm 0,2$.

Последнее правило затрудняет обработку результатов измерений при помощи ПЭВМ. В связи с этим, если первая из отбрасываемых цифр равна пяти, предлагается увеличивать последнюю из оставшихся цифр на единицу.

1.5. Классы точности средств измерений

Класс точности - это обобщенная характеристика средств измерений, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющих на их точность.

Пределы допускаемых погрешностей устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений. Класс точности не является непосредственным показателем точности средств измерения, а только лишь характеризует их свойства в отношении точности, т.к. на точность измерения влияют также методы и условия проведения измерений.

Пределы допускаемых основной и дополнительных погрешностей средств измерений устанавливаются для каждого класса точности в виде абсолютных, относительных и приведенных погрешностей.

Для средств измерения, для которых предел дополнительной погрешности выражается в абсолютных единицах измерения, класс точности выражается условным порядковым номером, причем при большей допускаемой погрешности присваивается класс с большим порядковым номером (например, Кл. №1, Кл. №3 и т.д.).

Средствам измерения, пределы допускаемой основной погрешности которых заданы в виде приведенных или относительных погрешностей, присваиваются классы точности, выбираемые из стандартного ряда:

$$K = (1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0) \cdot 10^n, \text{ где } n = 1; 0; -1; -2.$$

В скобках указаны значения погрешностей, выраженные в процентах, при этом, чем выше класс точности, тем меньшим значением он обозначен. Например, класс точности 0,5 (K=5; n=-1) выше класса точности 1,5 (K=1,5; n=0).

Таким образом, в этом случае класс точности для средств измерения может быть определен как **предел основной погрешности, приведенный ко всему диапазону измерения, выраженный в процентах.**

Пример 1.1. Определить класс точности термометра с диапазоном измерения 0 - 50 °С, если по результатам измерений X в различных точках шкалы X_д экспериментально установлены следующие данные:

X _д , °С	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	Примечание
X, °С	4,5	10,2	14,9	19,7	25,7	29,5	34,6	40,5	45,4	49,7	
Δ, °С	0,5	-0,2	0,1	0,3	-0,7	0,5	0,4	-0,5	-0,4	0,3	Δ= X _д - X
δX, %	1	-0,4	0,2	0,6	-1,4	1	0,8	-1	-0,8	0,6	$\delta = \frac{\Delta}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot 100\%$

Максимальная приведенная погрешность термометра по абсолютной величине составляет 1,4 % в точке измерения 25 °С, следовательно, исходя из стандартного ряда, принимаем класс точности термометра **K = 1,5**.

Пример 1.2. Манометр класса точности 1,0 имеет диапазон измерений 0 – 0,8 МПа. Определить пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при измерении давления.

По определению класса точности имеем:

$$\max \delta = \frac{\Delta}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot 100 \% = 0,5; \quad X_{\min} = 0 \text{ МПа} \quad X_{\max} = 0,8 \text{ МПа},$$

$$\text{Отсюда } \Delta = \pm \frac{X_{\max} - X_{\min}}{100} = \frac{0,8 - 0}{100} = \pm 0,008 \quad (\text{МПа}).$$

Пределы допускаемой основной погрешности - это установленные для нормальных условий экстремальные (наибольшие и наименьшие) отклонения значений номинальной статической функции преобразования, при заданной доверительной вероятности, расположенные симметрично по обе стороны от этой функции.

Пределы допускаемой основной погрешности содержат случайную и систематическую составляющие погрешности.

Пределы допускаемой дополнительной погрешности – это наибольшее и наименьшее допускаемые значения дополнительной погрешности, вызываемые условиями измерения, отличающимися от нормальных.

Под нормальными условиями применения средств измерения следует понимать условия, при которых влияющие величины (температура окружающего воздуха, давление, влажность и т.д.) имеют нормальные значения, а также определенное пространственное положение, отсутствие вибраций, излучение и электромагнитных полей.

В качестве нормальных значений или области нормальных значений влияющих величин обычно принимается температура окружающего воздуха – 20 ± 5 °С; давление – $101,325 \pm 3,3$ кПа (760 ± 25 мм рт.ст.); относительная влажность – 30-80% и т.д. Указанные нормальные условия применения средств измерения, как правило, не являются рабочими условиями их эксплуатации. Поэтому для средств измерения обычно определяют область значений влияющей величины, оговариваемую в технических условиях или стандартах, при которой значение дополнительной погрешности не должно превышать установленных пределов.

Кроме того, необходимо отметить, что в рабочих условиях на средства измерения могут влиять внешние воздействия, которые не отражаются непосредственно на результатах измерений (агрессивные среды, запыленность), а также механические воздействия (удары, тряска, вибрации) во время действия которых невозможно произвести корректное измерение. В связи с этим приборы, предназначенные для работы в указанных условиях, защищают специальными устройствами.

В зависимости от степени защищенности от внешних воздействий и устойчивости к ним средства измерения подразделяются на обыкновенные, виброустойчивые, пылезащищенные, брызго- и влагозащищенные, газозащищенные, искрозащищенные, взрывозащищенные и т. д. Применение приборов с тем или иным видом защиты дает возможность подбора средств измерений применительно к конкретным рабочим условиям.

В случае нормирования предела допускаемой суммарной дополнительной погрешности при одновременном действии внешних воздействий последний должен определяться в соответствии с выражением:

$$\delta_{\text{доп}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_{\text{доп}i}^2} \leq 2\delta_{\text{осн}} , \quad (1.13)$$

где $\delta_{\text{доп}}$ - общий предел дополнительной погрешности;

$\delta_{\text{осн}}$ - предел основной погрешности;

$\delta_{\text{доп}i}$ - предел дополнительной погрешности от i -го воздействия.

1.6. Статические и динамические характеристики

Помимо точностных характеристик средства измерения обладают статическими и динамическими характеристиками, отражающими взаимосвязь входных и выходных сигналов в установившихся и переходных режимах. В большинстве случаев средства измерения осуществляют преобразование входных сигналов в выходные и обладают свойством направленности, т.е. исключается действие выходного сигнала на входной, при этом это преобразование может быть описано в общем виде функциональной зависимостью:

$$y = f(x), \quad (1.14)$$

которая в установившемся режиме называется *статической характеристикой* или *градуировочной характеристикой*, либо *уравнением шкалы*. Статические характеристики измерительных приборов и преобразователей могут быть заданы аналитически, в виде таблиц или графиков (см.рис. 1.3).

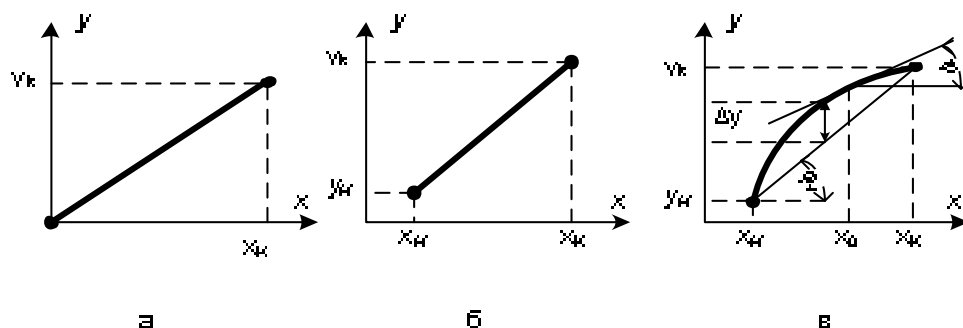


Рис. 1.3 – Статические характеристики средств измерения
а, б – линейные, в - нелинейная

Линейная или линеаризованная статическая характеристика может быть описана в общем случае уравнением следующего вида:

$$y = a + k \cdot x, \quad (1.15)$$

где a – постоянная, имеющая размерность выходной переменной “ y ”;

k – коэффициент передачи, имеющий размерность “ y/x ”

Тогда уравнение шкалы прибора можно записать следующим образом:

$$y = y_H + S \cdot (x - x_H), \quad (1.16)$$

где y_H и x_H – начальные значения выходной и входной величин, соответственно;

S – чувствительность прибора, определяемая по формуле:

$$S = \frac{y_K - y_H}{x_K - x_H} = \frac{Y_D}{X_D}, \quad (1.17)$$

где Y_D и X_D – диапазон изменения выходного и входного сигналов.

На практике для проведения измерений желательно использовать средства с линейной статической характеристикой. Однако, в случае использования средств измерения с нелинейной характеристикой, последнюю по возможности необходимо линеаризовать, используя метод касательной или метод секущей.

Мерой оценки нелинейности характеристики служит относительная нелинейность, определяемая соотношением:

$$\nu = \frac{\Delta Y}{X_K - X_H}, \quad (1.18)$$

где ΔY – максимальное отклонение выходной координаты статической характеристики от прямой, соединяющей начало и конец нелинейной характеристики (см. рис. 1.2).

Под чувствительностью прибора с нелинейной характеристикой понимают предел отношения изменения выходной величины Δy к изменению входной Δx :

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta Y}{\Delta X} \right| = \frac{dy}{dx}. \quad (1.19)$$

Таким образом, чувствительность для прибора с линейной характеристикой остается постоянной, а для нелинейной зависит от входного сигнала.

При линейризации статической характеристики методом касательной чувствительность средства измерения по графику можно определить следующим образом:

$$S = k_k = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x_0} = \frac{n_y}{n_x} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.20)$$

а при использовании метода секущей, который допускается использовать при небольших значениях ΔY , используется выражение (см.рис. 1.2):

$$S = k_c = \frac{Y_D}{X_D} = \frac{n_y}{n_x} \cdot \operatorname{tg} \varphi_1 \quad (1.21)$$

Здесь n_y и n_x масштабы графика $y = f(x)$ по соответствующим осям.

Коэффициент передачи средств измерения зависит от их структуры и количества элементов, входящих в схему измерения. Несмотря на большое разнообразие структурных схем для средств измерения, можно выделить три основных типа соединения между элементами измерительных устройств и измерительных комплексов: последовательное, параллельное и параллельно-встречное (с обратной связью), которые представлены на рис.1.4.

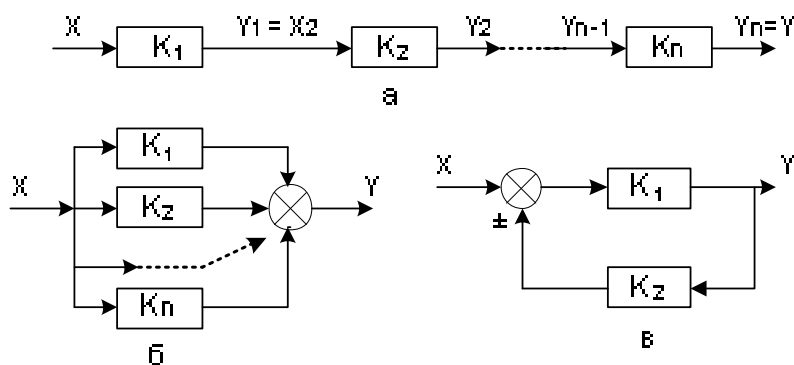


Рис. 1.4 – Соединения структурных звеньев средств измерения:
а – последовательное, б – параллельное, в – параллельно-встречное

Для последовательного соединения элементов эквивалентный коэффициент передачи определяется в соответствии с формулой:

$$K_{э\kappa\theta} = \prod_{i=1}^n Ki, \text{ где } n - \text{ количество элементов в схеме.} \quad (1.22)$$

Для параллельного соединения:

$$K_{э\kappa\theta} = \sum_{i=1}^n Ki. \quad (1.23)$$

Для параллельно-встречного соединения:

$$K_{э\kappa\theta} = \frac{K_1}{1 \pm K_1 K_2}, \quad (1.24)$$

причем знак «+» соответствует отрицательной обратной связи, а знак «-» - положительной.

Порог чувствительности измерительного прибора – наименьшее значение измеряемой величины, которое способно вызвать малейшие изменения показаний измерительного прибора. Как правило, порог чувствительности выражается в долях допустимой основной абсолютной погрешности средства измерения.

Вариация - величина, характеризующая стабильность статической характеристики средства измерения и определяется как наибольшая разность $V_x = |y_i - y'_i|$ между выходными сигналами прибора, соответствующими одному и тому же значению измеряемой величины при увеличении и уменьшении измеряемой величины x_i , см. рис. 1.5.

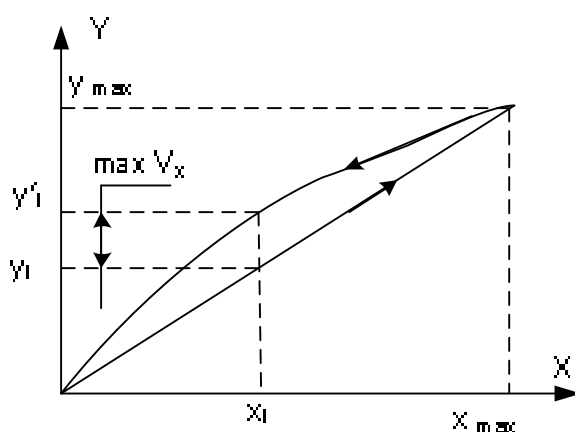


Рис. 1.5 - Нестабильность хода статической характеристики

Вариацию средств измерения обычно выражают в процентах нормирующего значения измеряемой величины (в частности диапазона измерений) и определяют по формуле:

$$Var = \frac{Vx}{X_N} = \frac{Vx}{X_{\max} - X_{\min}} 100\% . \quad (1.25)$$

Причинами возникновения вариаций в приборах являются трение в подвижных узлах, люфты и т.д.

Динамические характеристики средств измерения определяются переходными процессами, происходящими в них, в результате действия ступенчатых, импульсных или колебательных возмущений на входе измерителя. Виды апериодического и колебательного переходных процессов в средствах измерения на ступенчатое возмущение представлены на рис.1.6

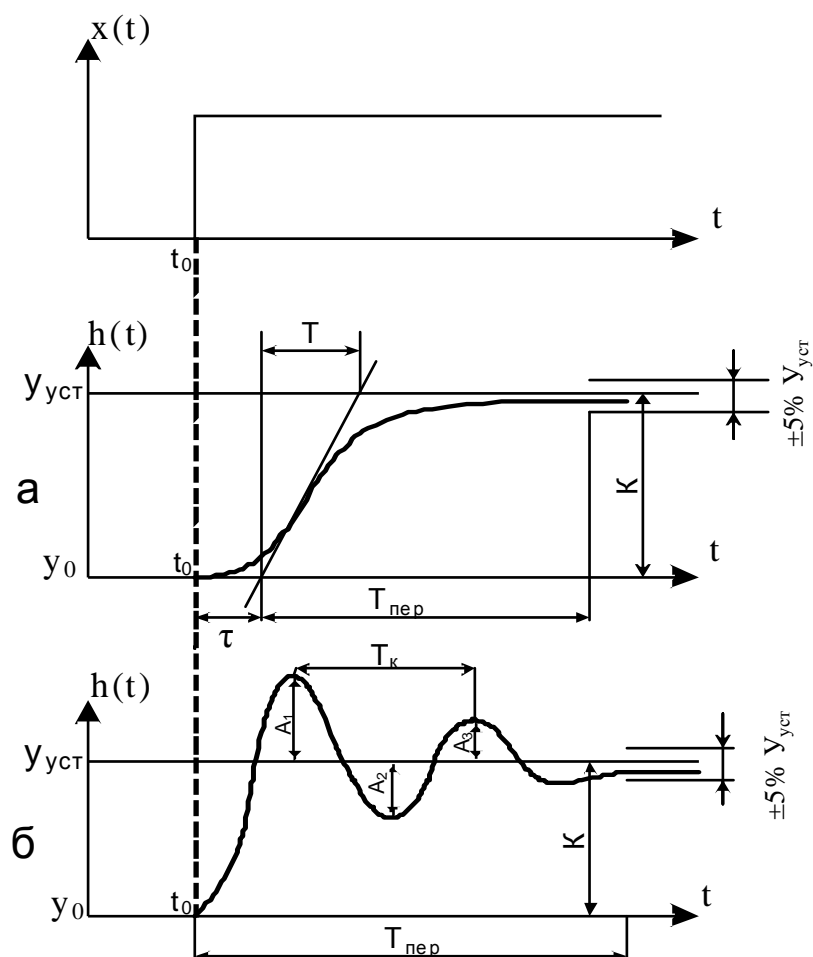


Рис. 1.6 – Переходные процессы в средствах измерения:

а - периодический; б – колебательный

По переходным характеристикам, представленным на рисунке, можно определить ряд параметров, характеризующих динамические свойства средств измерения. К ним относятся:

1. T - постоянная времени прибора;
2. $T_{\text{пер}}$ - время успокоения;
3. τ – время запаздывания;
4. T_k - период колебаний;
5. K - коэффициент передачи;
6. A_1 - динамическая ошибка (максимальный выброс первой амплитуды колебаний от установившегося значения показаний);
7. $\psi = \frac{A_1}{A_1 - A_3}$ - степень затухания.

По переходным характеристикам средств измерения определяются также передаточные функции и амплитудно-фазовые и частотные характеристики.

Для определения тех или иных динамических характеристик средств измерения необходимо руководствоваться их назначением и условиями применения. Наиболее часто используемыми динамическими характеристиками являются время установления показаний, а также рабочий диапазон частот.

Таким образом, динамические характеристики средств измерения определяют динамическую их погрешность, под которой понимают разность между погрешностью в динамическом и статическом режимах измерения в определенный момент времени.

Значения динамических погрешностей для средств с линейной статической характеристикой в различных точках измерения остаются практически одинаковыми. Если же при определении динамических погрешностей они изменяются в различных точках измерения, то средство измерения имеет нелинейную статическую характеристику.

Контрольные вопросы

1. Что такое прямое и косвенное измерение?
2. Основные методы измерений. В чем заключается их сущность?
3. Какими видами погрешностей характеризуются средства измерения? Объясните причины их возникновения.
4. Основные технические характеристики средств измерения.
5. Как оценить погрешности измерения? Виды оценок и их расчет.
6. Что такое класс точности средства измерения? Какие классы точности определены ГОСТом?
7. Каким образом получают динамические характеристики средств измерения? Перечислите их.
8. Перечислите технические элементы, входящие в структуру измерительных систем и комплексов.
9. Какие известны основные типы соединений элементов в структурах измерительных средств?

2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

2.1. Температура и температурные шкалы

Температура – степень нагретости вещества. Данное понятие основано на способности передавать тепло различными телами (веществом) друг другу при разной степени их нагретости и находиться в состоянии теплового равновесия при равных температурах. Причем тепло всегда передается от тела с более высокой температурой к телу с низкой температурой. Температура может быть также определена как параметр теплового состояния вещества, обуславливаемый средней кинетической энергией движения его молекул. Отсюда очевидно, что понятие «температура» для одной молекулы неприменимо, т.к. при какой-либо конкретной температуре энергия одной молекулы не может быть охарактеризована средним значением. Из данного положения следует, что понятие «температура» является статистическим.

Температура измеряется приборами, которые называются **термометрами**, в основу работы которых могут быть заложены различные физические принципы. Возможность измерения температуры такими приборами основывается на явлении теплового обмена телами с разной степенью нагретости и изменении их физических (термометрических) свойств при нагревании (охлаждении).

Для количественного определения температуры необходимо выбрать ту или иную **температурную шкалу**. Температурные шкалы строятся на основе определенных физических свойств какого-либо вещества, которые не должны зависеть от посторонних факторов и должны быть точно и удобно замеряемыми. На самом деле не существует ни одного термометрического свойства для термометрических тел или веществ, которые бы полностью удовлетворяли указанным условиям во всем диапазоне измеряемых температур. Поэтому температурные шкалы определяются для различных температурных диапазонов, построенных на произвольном допущении линейной зависимости

между свойством термометрического тела и температурой. Такие шкалы называются *условными*, а измеряемая по ним температура – *условной*.

К условной температурной шкале относится одна из распространенных шкал - шкала Цельсия. По этой шкале в качестве границ условного диапазона измерения приняты точки плавления льда и кипения воды при нормальном атмосферном давлении, а одну сотую часть данной шкалы принято называть одним градусом Цельсия (1°C).

Однако, построение такой температурной шкалы с использованием жидкостных термометров может привести к ряду затруднений, связанных со свойствами используемых термометрических жидкостей. Например, показания ртутного и спиртового термометров, работающих на принципе расширения жидкости, будут различными при измерении одной и той же температуры в силу различных коэффициентов их объемного расширения.

Поэтому для усовершенствования условной температурной шкалы было предложено использование газового термометра с использованием газов, свойства которых незначительно отличались бы от свойств идеального газа (водород, гелий, азот и др.).

С помощью газового термометра измерение температуры может быть основано на изменении объема или давления газа в замкнутой термосистеме:

$$T = f(V)|_{P=\text{const}} \quad \text{либо} \quad T = f(P)|_{V=\text{const}}$$

На практике более широкое распространение получил способ, основанный на измерении давления при постоянном объеме, т.к. является более точным и легко реализуемым.

Для создания единой температурной шкалы, не связанной с термометрическими свойствами различных веществ для широкого интервала температур, Кельвином была предложена шкала температур, основанная на втором законе термодинамики. Эта шкала получила название *термодинамической температурной шкалы*.

В ее основе лежат следующие положения:

Если при обратимом цикле Карно тело поглощает теплоту Q_1 при температуре T_1 и отдает тепло Q_2 при температуре T_2 , то должно соблюдаться следующее равенство:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{Q_1}{Q_2}. \quad (2.1)$$

Согласно положениям термодинамики данное соотношение не зависит от свойств рабочего тела.

Термодинамическая температурная шкала Кельвина стала использоваться как исходная шкала для других температурных шкал, не зависящих от термометрических свойств рабочего вещества. Для определения одного градуса по этой шкале интервал, находящийся между точками плавления льда и кипения воды, делится, как и в стоградусной шкале Цельсия, на сто равных частей. Таким образом, 1°C оказывается равным 1°K .

По данной шкале, принятой называться *абсолютной* за нулевую точку принимается температура на $273,15^\circ$ ниже точки плавления льда, называемая абсолютным нулем. Теоретически доказано, что при этой температуре прекращается всякое тепловое движение молекул любого вещества, поэтому эта шкала в известной мере носит теоретический характер.

Между температурой T , выраженной в Кельвинах, и температурой t , выраженной в градусах Цельсия, действует соотношение:

$$t = T - T_0, \quad (2.2)$$

где $T_0 = 273,15 \text{ K}$.

Из существующих термометров наиболее точно реализуют абсолютную температурную шкалу газовые термометры в интервале не выше 1200°C . Использование этих термометров при более высоких температурах сталкивается с большими трудностями, кроме того, газовые термометры являются достаточно сложными и громоздкими приборами, что для практических целей неудобно. Поэтому для практического и удобного воспроизведения термодинамической шкалы в широких диапазонах изменения температур приняты и используются Международные практические

температурные шкалы (МПТШ). В настоящее время действует принятая в 1968 году температурная шкала МПТШ-68, построение которой базируется на реперных точках, определяемых фазовым состоянием веществ. Данные реперные точки используются для эталонизации температур в различных диапазонах, которые приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 - Основные реперные точки по МПТШ-68

N пп	Состояние фазового равновесия	Значение температуры	
		К	°С
1	Тройная точка равновесного водорода	13,81	-259,34
2	Точка кипения равновесного водорода	20,28	-252,89
3	Равновесие между жидкой и парообразной фазами неона	27,102	-246,048
4	Тройная точка равновесного кислорода	54,361	-218,789
5	Точка кипения кислорода	90,188	-182,962
6	Тройная точка воды (основная точка)	273,16	0,01
7	Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды	373,15	100
8	Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка	692,73	419,58
9	Равновесие между твердой и жидкой фазами серы	717,75	444,6
10	Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра	1235,08	961,93
11	Равновесие между твердой и жидкой фазами золота	1337,58	1064,43

*) тройная (двойная) равновесные точки веществ означают одновременное существование соответствующего количества фаз рассматриваемого вещества.

В настоящее время наряду с выражением температуры в кельвинах (К) и градусах Цельсия (°С) за рубежом часто используют градусы Фаренгейта (°F), градусы Ранкина (°Ra) и градусы Реомюра (°Re). Пересчет числовых значений температуры из одной шкалы в другую осуществляется по следующим соотношениям:

$$n^{\circ}C = nK - 273.15 = \frac{5}{9}(n^{\circ}F - 32) = \frac{5}{9}(n^{\circ}Ra - 273.15) = \frac{5}{4}n^{\circ}Re. \quad (2.3)$$

Пример пересчета реперных точек стоградусной термодинамической шкалы приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Градусы	С	К	F	Ra	Re
Температура плавления льда	0	273,15	32,04	273,15	0
Температура кипения воды	100	373,15	212	453,15	80

2.2. Термометры, работающие на принципах расширения и изменения давления рабочего вещества

2.2.1. Термометры стеклянные жидкостные

Термометры стеклянные жидкостные используются для измерения температур в достаточно широком диапазоне, с границами от минус 200 до 750 °С. Эти термометры получили широкое распространение как в промышленности, так и в лабораторной практике. Рабочим веществом в жидкостных термометрах в зависимости от измеряемых температур могут использоваться различные жидкости, а корпуса термометров изготавливаются из стекла различных марок (боросиликатное и кварцевое стекло). Область применения стеклянных термометров, а также значения коэффициентов видимого и действительного расширения приведены в таблице 2.3.

Принцип действия таких термометров основан на тепловом расширении рабочей жидкости, заключенной в рабочий объем термометра, состоящий из резервуара и капилляра. Для жидкостных термометров расчет шкалы осуществляется по следующей формуле:

$$t = t_1 + \frac{V - V_1}{V_2 - V_1} (t_2 - t_1), \quad (2.4)$$

где t – измеренная температура;

V – объем жидкости при данной температуре;

t_1, t_2 – температура таяния льда и кипения воды, соответственно;

V_1, V_2 – объемы жидкости при температурах t_1 и t_2 .

При этом показания жидкостного термометра зависят не только от объемного расширения жидкости, но и от расширения стеклянного резервуара и капилляра. Поэтому видимое расширение жидкости будет несколько меньше действительного, а именно на величину объемного расширения стекла.

Из жидкостных термометров наибольшее распространение получили термометры с ртутным заполнением, т.к. она не смачивает стекла, в отличие от органических жидкостей, тем самым уменьшается дополнительная погрешность, а также остается жидкой в интервале температур от $-38,8$ до $+356,5$ °С при нормальном давлении. Для увеличения верхней границы диапазона измерения в капилляр над ртутью закачивается инертный газ с

избыточным давлением, что приводит к повышению температуры кипения ртути. Так, например, при измерении температуры от +500 °С давление газа в термометре может составлять 20 кгс/см² и более.

Таблица 2.3 - Характеристики жидкостных стеклянных термометров

Жидкость	Пределы измерения, °С		Коэффициент объемного теплового расширения, К ⁻¹	
	нижний	верхний	действительный	видимый
Ртуть	- 35	750	0,00018	0,00016
Керосин	- 60	300	0,00095	0,00093
Этиловый спирт	- 80	70	0,00105	0,00103
Толуол	- 90	200	0,00109	0,00107
Петролейный эфир	- 120	25	0,00152	0,00150
Пентан	- 200	20	0,00092	0,00090

Конструктивно формы стеклянных жидкостных термометров разнообразны, однако среди этого разнообразия можно выделить два основных типа конструкций: палочные и со вложенной шкалой, которые представлены на рис. 2.1а и 2.1б.

Палочные термометры представляют собой толстостенный капилляр с внешним диаметром 6—8 мм, у которого непосредственно на внешней поверхности стеклянного капилляра наносятся деления шкалы.

Особенностью второй конструкции является то, что его шкала изготавливается на отдельной прямоугольной стеклянной пластинке молочного цвета, помещенной позади капиллярной трубки. Кроме того, у таких термометров к резервуару припаяна защитная стеклянная оболочка, в которой и находится как капилляр, так и шкальная пластина. Термометры со вложенной шкалой обладают большей инерционностью, чем палочные, но они более удобны для наблюдения при измерении температур в лабораторных и производственных условиях.

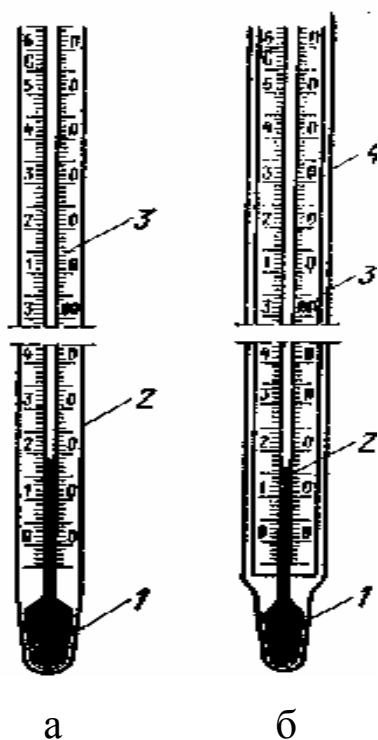


Рис. 2.1 - Термометры
а - палочный; б - вложенная шкала;
1 - резервуар; 2 - капилляр;
3 - шкала; 4 - стеклянный корпус

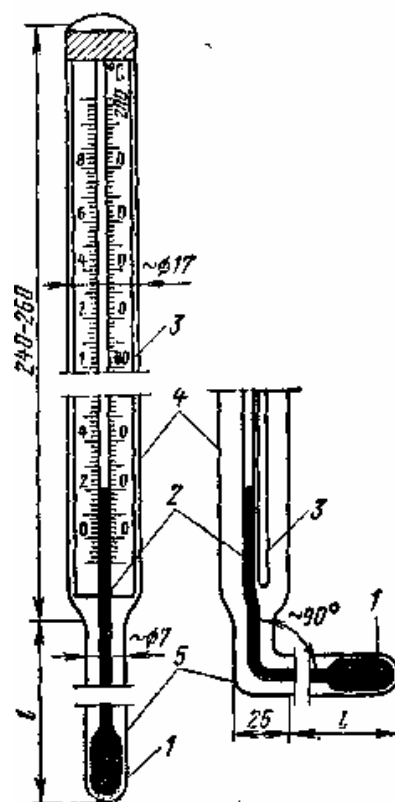


Рис.2.2 - Технические термометры
1 - резервуар; 2 - капилляр;
3 - шкала; 4 - оболочка;
5 - нижняя часть термометра (l).

Для повышения точности измерения температуры применяются термометры с укороченной шкалой. Термометры такого типа выпускаются в основном со вложенной шкалой с ценой деления от $0,01^{\circ}\text{C}$ до $0,1^{\circ}\text{C}$ в зависимости от температурного диапазона шкалы. Данные термометры применяются для лабораторных точных измерений и имеют четыре типоразмера. Технические характеристики этих термометров приведены в таблице 2.4. Ртутные технические термометры предназначены для измерения температур в диапазоне от -30 до $+600^{\circ}\text{C}$, а термометры с органическими жидкостями от -90 до $+30^{\circ}\text{C}$ и от -60 до $+200^{\circ}\text{C}$. Технические термометры изготавливаются только со вложенной шкалой, прямыми и угловыми (угол изгиба составляет 90°), причем их нижняя часть выполняется длиной от 66 до 2000 мм и при измерениях должна быть полностью погружена в измеряемую среду. Общий вид технических термометров приведен на рис. 2.2.

Таблица 2.4 - Характеристики ртутных термометров
для точных измерений

Тип термометра	Измеряемые температуры, °С	Диапазон измерений, °С	Цена деления, °С	Количество термометров в типоразмере
ТР-I	0-60	4	0,01	15
ТР-II	55-155	10	0,02	10
ТР-III	140-300	20	0,05	8
ТР-IV	300-500	50	0,1	4

Допустимые погрешности для показаний лабораторных и технических термометров в зависимости от интервалов измеряемых температур и цены деления приведены в табл. 2.5. Погрешности, приведенные в этой таблице, действительны для термометров, рассчитанных на измерение температуры как при погружении до отсчитываемого деления, так и при постоянной глубине погружения.

Таблица 2.5 - Допустимые погрешности термометров

Температурные интервалы		Допустимая погрешность при цене деления, °С				
от	до	0,1 и 0,2	0,5	1	2	5 и 10
- 30	0	-	± 1	± 1	± 2	-
+ 1	+ 100	± 0,2	± 1	± 1	± 2	-
+ 101	+ 200	-	± 1	± 2	± 3	± 5
+ 201	+ 300	-	± 2	± 3	± 4	± 5
+ 301	+ 400	-	-	± 4	± 5	± 10
+ 401	+ 500	-	-	± 5	± 5	± 10

Широкое распространение среди жидкостных ртутных термометров получили электроконтактные термометры, которые применяются для целей сигнализации и простейшего регулирования тепловыми объектами, при этом столбик ртути представляет собой замыкающий контакт. Эти термометры выпускаются с постоянно впаянными несколькими контактами (тип термометра ТЭК) или с одним, но переменным контактом, который переустанавливается внутри капилляра при помощи специальной магнитной муфты (тип ТПК). На

рис.2.3 приведены разновидности электроконтактных термометров. Электроконтактные термометры применяются для цепей постоянного и переменного тока, а настройка температуры контактирования осуществляется по контрольному термометру. Данные термометры могут изготавливаться прямыми и угловыми, а также иметь защитную оправку.

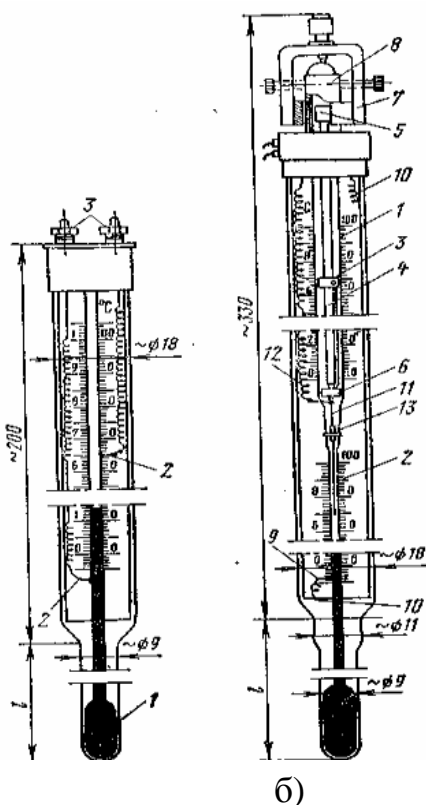


Рис. 2.3 - Термометр электроконтактный:
а - ТЭК; б - ТПК

- 1 - нижняя часть термометра (/);
2 - металлические контакты, впаянные в капилляр; 3 - зажимы, соединенные с контактами.

Для термометров типа ТЭК минимальные интервалы между соседними контактами не должны быть менее 1/10 диапазона температур контактирования, а допускаемая погрешность показаний по шкале ТЭК не должна быть более наименьшей цены деления.

Электроконтактный термометр переменного контактирования типа ТПК (см. рис. 2.3б) имеет две шкалы: нижнюю – рабочую и верхнюю – вспомогательную. Верхняя шкала нанесена на шкальную пластинку, расположенную вдоль овальной стеклянной трубки 1, соединенной с капилляром 2. Указателем этой шкалы при настройке термометра является гайка 3, которая может перемещаться

по микровинту 4. Верхний конец микровинта жестко соединен со стальным цилиндрическим якорем 5, а нижний его конец опирается на подпятник 6. Вращение якоря и микровинта, а также перемещение овальной гайки по винту осуществляется с помощью постоянного магнита 7, установленного на колпачке 8, который надет на стеклянную трубку, припаянную к овальной трубке 1.

Термометр имеет один неподвижный и один подвижный контакт. Неподвижный контакт 9, соединенный с медным проводом 10, впаян в капилляр ниже нулевой отметки основной шкалы. Подвижный контакт 11 выполнен из тонкой вольфрамовой проволоки, верхний конец которой закреплен в овальной гайке 3. Этот контакт соединен с медным проводом 12 следующим образом: подвижный контакт - подпятник; подпятник - выводной проводник, впаянный в овальную трубку; выводной проводник - медный провод 12. Нижняя часть вольфрамовой проволоки проходит через отверстие в подпятнике, далее соприкасается с выводным проводником, припаянным к подпятнику, и затем проходит через отверстие направляющей стеклянной втулки 13, впаянной в расширенную часть капилляра. Таким образом, нижний конец вольфрамовой проволоки, находящийся в измерительном капилляре, является подвижным контактом термометра. Если овальная гайка будет передвинута по микровинту с помощью магнита на определенную отметку верхней шкалы, то нижний конец вольфрамовой проволоки (подвижный контакт) будет установлен против соответствующей отметки нижней основной шкалы. При нагревании (охлаждении) нижней части термометра до заданной температуры ртуть в капилляре соединит (разомкнет) нижний контакт с подвижным контактом.

Допускаемые отклонения отсчета по шкале электроконтактного термометра типа ТПК при его настройке не должны превышать также цены наименьшего деления.

Для электроконтактных термометров типа ТПК для электрических коммутаций применяются универсальные промежуточные реле, работающие от напряжения 24, 48 и 110 вольт постоянного тока, а также 36, 110, 127 и 220 вольт переменного тока. Необходимо отметить, что нагрузка на контактах термометра не должна превышать 0,5 мА при напряжении не больше 0,3 В.

Применяются также электроконтактные ртутные термометры палочные бесшкальные. Они имеют металлические контакты, впаянные в толстостенный капилляр в местах, соответствующих определенным температурам.

Электроконтактные палочные термометры могут работать в цепях постоянного и переменного тока при допустимой разрывной мощности электрических контактов не более 2-х ватт при силе тока не более 0,2 ампера.

При использовании стеклянных жидкостных термометров, особенно для точных (лабораторных) измерений температуры, необходимо учитывать процесс старения стекла, который вызывает смещение нулевой точки и на которое необходимо вводить поправку.

Как известно, стекло обладает значительным термическим последствием, выражающимся в том, что оно после нагревания до размягчения претерпевает молекулярное перемещение. В силу этого свойства резервуар термометра при охлаждении после временного нагрева принимает первоначальный объем, соответствующий температуре до нагрева в течение длительного времени, что особенно характерно для вновь изготовленных термометров. Такой процесс называется естественным старением стекла. Уменьшение влияния этого воздействия на результаты измерения в значительной мере может быть уменьшено искусственным старением, т.е. продолжительным нагревом (отжигом) термометра до температуры, равной верхнему пределу шкалы, с постепенным его охлаждением до комнатной температуры.

Поправка к показаниям термометров на смещение нулевой точки определяется в соответствии со следующим выражением:

$$\Delta t = t_0 - t_0', \quad (2.5)$$

где t_0 – паспортное положение нулевой точки;

t_0' – положение нулевой точки, определенное экспериментально.

Пример 2.1. В освидетельствовании стеклянного термометра поправка, относящаяся к 200 °С, составляет $\Delta t_{200} = -0,2$ °С, а относящаяся к положению нулевой точки $-0,1$ °С. В результате поверки термометра положение нулевой точки соответствует $+0,2$ °С. Отсюда новая поправка, в нулевой точке по выражению (2.5) составит:

$$\Delta t = -0,1 - (+0,2) = -0,3,$$

$$\text{а в точке } 200^\circ\text{С будет равна } \Delta t_{200} = -0,2 + \Delta t = -0,2 + (-0,3) = -0,5^\circ\text{С}.$$

Помимо поправок на смещение нулевой точки при точном измерении температур необходимо также вводить поправку на выступающий столб жидкости термометра, когда последний не может быть погружен в измеряемую среду до отсчитываемого деления на шкале.

Поправка на выступающий столб жидкости в этом случае может быть рассчитана по формуле:

$$\Delta t = n \cdot \alpha \cdot (t - t_1), \quad (2.6)$$

где Δt – поправка на выступающий столб термометрической жидкости, $^{\circ}\text{C}$;

n – высота выступающего столба в градусах шкалы термометра;

t – температура, показываемая термометром, $^{\circ}\text{C}$;

t_1 – температура выступающей части, измеряемая дополнительно, $^{\circ}\text{C}$;

α – видимый коэффициент расширения жидкости в стекле, град^{-1} .

Один из возможных способов определения средней температуры выступающей части столба термометрической жидкости показан на рис. 2.4. В соответствии с приведенным рисунком, температура выступающего столба определяется с помощью вспомогательного термометра 2, резервуар которого прижимается к середине выступающей части столбика основного термометра 1. При этом вспомогательный термометр хорошо изолируется (например, асбестовым шнуром) и должен быть по возможности меньших габаритов. Этот способ определения средней температуры является приближенным, т.к. поправка при этом не может быть определена точнее $\pm 10\%$.

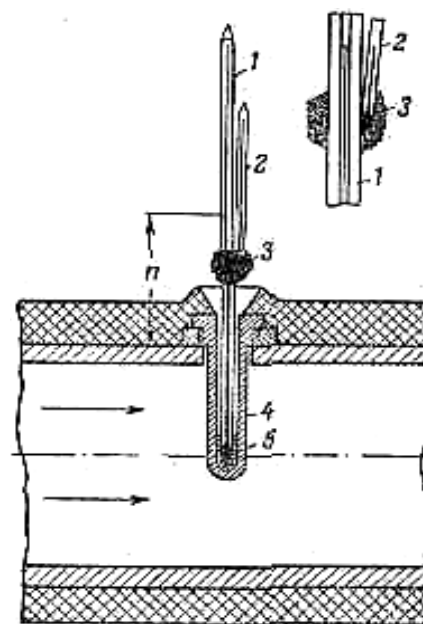


Рис. 2.4 - Измерение температуры выступающего столба.

- 1 - основной термометр;
- 2 - вспомогательный термометр;
- 3 - асбестовый шнур;
- 4 - гильза;
- 5 - измеряемая среда

Пример 2.2. Лабораторный ртутный термометр погружен до отметки 100°C и показывает 250°C , при этом температура, показываемая вспомогательным термометром, равна 40°C . Коэффициент видимого расширения ртути $\alpha \approx 1,6 \cdot 10^{-4}$. Отсюда поправка на выступающий столбик ртути будет равна: $\Delta t = (250-100) \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot (250-40) = 3,04^{\circ}\text{C}$, а исправленное показание термометра составит: $250 + 3,04 = 253,04^{\circ}\text{C}$.

2.2.2. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на изменении объема либо давления рабочего вещества в зависимости от температуры. К первому типу приборов относятся манометрические жидкостные приборы, а ко второму типу – паровые и газовые.

Манометрические термометры являются техническими приборами для измерения температуры в пределах от -150 до 600°C , в зависимости от рабочего вещества, и применяются в различных областях техники. При этом их основная погрешность не превышает $\pm 1,5\%$.

Следует отметить, что манометрические термометры допускают передачу показаний на сравнительно большие расстояния (до 60 м). Преимуществом манометрических термометров является простота конструкции, вибрационная устойчивость и полная взрывобезопасность, если отсутствуют электрические контакты. К недостаткам их можно отнести необходимость сравнительно частых проверок и трудность ремонта при поломке капилляра.

Манометрические термометры изготавливаются показывающими и регистрирующими с дисковой или ленточной диаграммной бумагой, привод которой осуществляется синхронным электродвигателем или часовым механизмом. Шкалы, применяемые на этих термометрах, могут быть односторонними, двусторонними и безнулевыми.

Устройство манометрического термометра схематично показано на рис.2.5. Термометр состоит из термобаллона 1, погружаемого в измеряемую среду, капилляра 2 и согнутой по кругу манометрической пружины 3, имеющей в сечении форму эллипса и впаянной в держатель 4. Внутренняя полость

манометрической трубки связана при помощи капилляра с термобаллоном, образующие термосистему. Свободный конец пружины герметизирован и шарнирно с помощью поводка 5 связан с сектором 6. Этот сектор в свою очередь соединен зубчатым зацеплением с трибкой 7, на оси которой закреплена указательная стрелка 8. Для выбора зазора в передаточном механизме установлен спиральный волосок 9, конец внутреннего витка которого закреплен на оси трибки. Для компенсации изменения температуры окружающей среды в приборе предусматривается биметаллический термокомпенсатор 10.

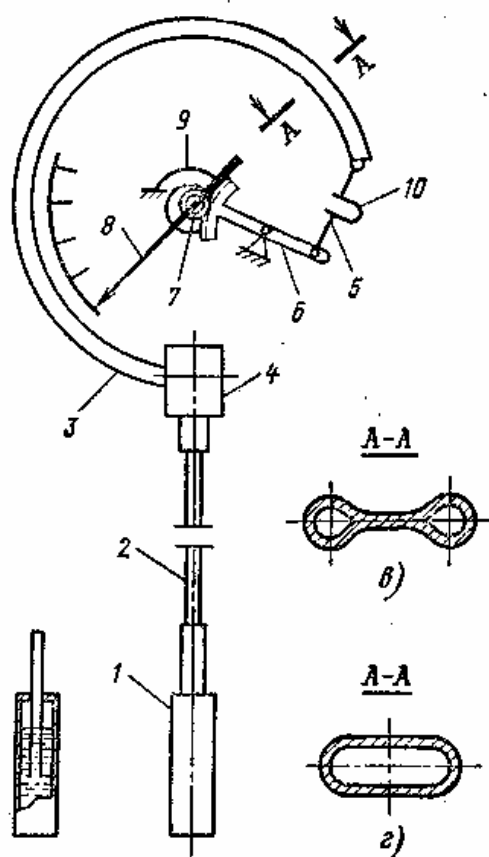


Рис.2.5 - Схема термометра манометрического:
 1 - термобаллон; 2 - капилляр;
 3 - манометрическая трубка;
 4 - держатель; 5 - поводок;
 6 - сектор зубчатый; 7 - трибка;
 8 - стрелка; 9 - волосок;
 10 - компенсатор.

Манометрические термометры могут быть изготовлены с дополнительным устройством для сигнализации (или регулирования) температуры. Некоторые типы термометров снабжаются передающим преобразователем с выходным унифицированным сигналом постоянного тока 0-5 мА или пневматическим передающим преобразователем с выходным унифицированным пневматическим сигналом 0,2-1 кгс/см² (0,02-0,1 МПа).

Внешний вид манометрического термометра с электрическими контактами показан на рис.2.6.

Наряду с трубчатыми пружинами в манометрических термометрах используются винтовые, спиральные пружины, а также сильфоны. Эти пружины в зависимости от рабочего вещества изготавливаются из латуни или

стали.

Капилляр термометров изготавливают из меди и стали с наружным диаметром 1,2-5 мм и внутренним диаметром 0,15 – 0,5мм. Длина капилляра стандартизирована и может принимать следующие значения: 1; 1,6; 2,5; 4; 6; 25; 40 и 60 метров.

Манометрические газовые термометры могут применяться для измерения температур в полном диапазоне ее изменения ($-150 \div 600$ °С) при этом в качестве заполнителя термосистемы используется азот.



Рис.2.6 - Термометр манометрический (внешний вид)

Уравнение, в соответствии с которым изменяется давление в термосистеме при постоянном объеме, имеет вид:

$$P_t = P_0 \cdot (1 - \beta \cdot t), \quad (2.7)$$

где P_0 - давление газа при температуре 0 °С;

β - термический коэффициент давления, K^{-1} ($\beta = 1/T_0$); для идеального газа $\beta = 0,003661 K^{-1}$, а для азота $\beta = (0,003661 - 0,000013 \cdot P_0)$.

Манометрические термометры, заполненные жидкостью, применяются при измерении температур от -150 до +300 °С. В качестве рабочей жидкости в них используются пропиловый спирт либо силиконовые жидкости. Шкала жидкостного манометрического термометра, как и для газового, является практически равномерной и линейной. Однако, как известно, жидкость, применяемая в термосистеме, является несжимаемой, поэтому объем термосистемы для таких термометров должен быть согласован с типом применяемой жидкости и диапазоном измерения температур.

При нагреве термобаллона от начальной температуры t_n до конечной t_k жидкость расширяется, термобаллон увеличит свой объем, а количество жидкости, вытесняемой из термобаллона, создающее избыточное давление в термосистеме, определится в соответствии с формулой:

$$\Delta V = V \cdot (\beta - 3\alpha)(t_k - t_n), \quad (2.8)$$

где V – внутренний объем термобаллона, м^3 ;

β – объемный коэффициент расширения жидкости, K^{-1} ;

α – коэффициент линейного расширения материала термобаллона, K^{-1} .

Манометрические термометры рассчитаны на работу при температуре окружающей среды от $+5$ до $+50$ $^{\circ}\text{C}$ при относительной влажности воздуха до 80 %. Для промышленного применения они выпускаются с классами точности 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0, при этом класс точности устанавливается последней 2/3 части диапазона измерения, а для первой трети шкалы класс точности соответственно должен быть не хуже следующего по порядку из указанного ряда.

2.2.3. Дилатометрические и биметаллические термометры

В дилатометрических и биметаллических термометрах в качестве рабочего тела используются твердые материалы (в основном металлы). Их принцип действия основан на изменении размеров твердого тела в зависимости от изменения температуры в ограниченном температурном диапазоне, в котором сохраняется линейная зависимость удлинения рабочего тела от температуры. Зависимость изменения длины твердого тела от температуры может быть выражена следующей формулой:

$$L_t = L_0 \cdot (1 + \alpha t), \quad (2.9)$$

где L_t , L_0 – длина тела при рабочей и начальной температурах, соответственно;

α – средний коэффициент линейного расширения твердого тела, $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Коэффициенты линейного расширения металлов, применяемых в рассматриваемых термометрах, приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Коэффициенты линейного расширения некоторых металлов

Материал	$\alpha \cdot 10^{-4}, ^\circ\text{C}^{-1}$	Интервал температур
Алюминий (90%)	0,238-0,310	0-500
Латунь	0,183-0,236	0-400
Медь красная	0,253	0-150
Хромомолибденовая трубка	0,123	0-100
Сталь никелевая (Ni 20-22%)	0,200	0-500
Инвар	0,009	0-200

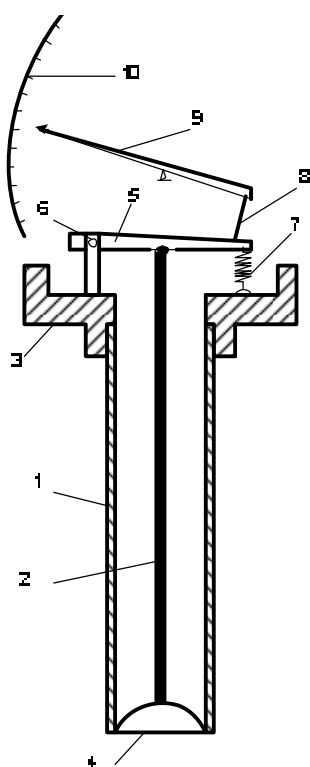


Рис.2.7 - Схема дилатометрического термометра

Дилатометрические термометры обладают рядом достоинств (простота устройства, высокая чувствительность), однако для непосредственного измерения температуры используются редко. В основном они находят применение в качестве первичных измерительных преобразователей в системах автоматического регулирования температуры.

На рис. 2.7 приведена схема устройства дилатометрического термометра. Он состоит из металлической трубки (чувствительного элемента) 1, внутри которой

находится стержень 2. Трубка имеет коэффициент линейного расширения больший, чем стержень. Верхний конец трубки закреплен в штуцере 3. С нижней стороны внутренний стержень крепится к настраивочной пробке 4. На верхний конец стержня, который находится в головке термометра, опирается основной рычаг 5, качающийся вокруг оси 6. Этот рычаг прижимается к стержню при помощи пружины 7 и соединяется с указательной стрелкой 9

посредством тяги 8. Отсчет температуры производится по шкале 10. При измерении температуры нижняя часть термометра (трубка 1) полностью погружается в измеряемую среду. При повышении температуры среды трубка удлиняется больше, чем стержень, вследствие чего стержень перемещается вниз. При перемещении стержня одновременно перемещается вниз и основной рычаг, который своим свободным концом устанавливает стрелку прибора в место шкалы, соответствующее измеряемой температуре.

В качестве чувствительного элемента в биметаллических термометрах используется пластина из двух полос различных металлов, сваренных по всей длине. Поскольку коэффициент линейного термического расширения для этих металлов различен, то при нагревании пластины происходит ее изгиб в направлении металла с меньшим коэффициентом расширения. При этом изгиб пластины может быть преобразован в перемещение указательной стрелки или в перемещение электрических нормально открытых (закрытых) контактов. Наиболее часто применяемыми металлами в биметаллических термометрах являются инвар-сталь или инвар-латунь.

При высоких температурах в биметаллической пластине в результате изгиба могут возникнуть напряжения, превышающие предел упругости металла, поэтому в этих термометрах предусматриваются соответствующие ограничители.

Применение dilatометрических и биметаллических термометров в качестве температурных реле, используемых в схемах дискретной автоматики, схематично показано на рис. 2.8 а, б.

Приведенное dilatометрическое реле (рис. 2.8, а) используется для сигнализации или дискретного регулирования температуры в диапазоне 100-300 °С. Чувствительным элементом данного устройства является трубка 1 и пружина контактов 2. Материал трубки имеет больший коэффициент температурного расширения по сравнению с материалом пружины. При нагревании чувствительного элемента трубка удлиняется и перемещается на

расстояние Δl и увлекает за собой упор 3, который, растягивая контактную пружину, разрывает контакты 5. Настройка температуры срабатывания реле производится при помощи винта 4, позволяющего регулировать первоначальный зазор Δl , изменяя тем самым разрывное усилие на контактах.

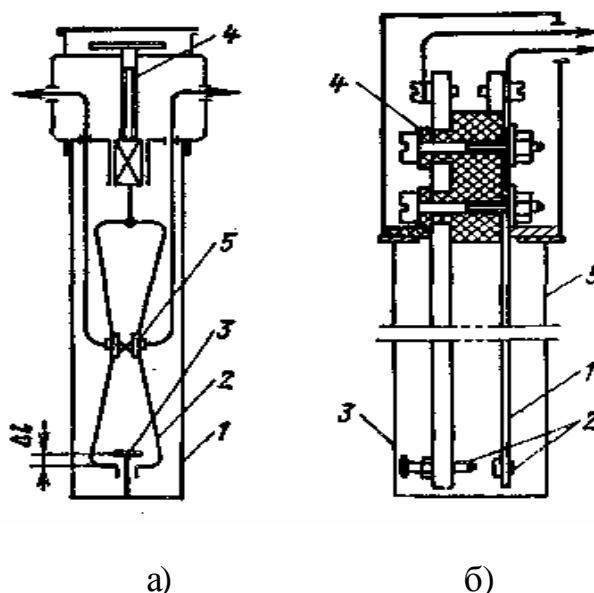


Рис. 2.8 - Реле температуры:

а) дилатометрическое типа РТ-300:

1 - термочувствительная трубка; 2 - пружина контактов; 3 - упор;
4 - регулировочный винт; 5 - электрические контакты;

б) биметаллическое:

1 - биметаллическая пластина; 2 - электрические контакты;
3 - регулировочный винт; 4 - электрический изолятор; 5 - защитная гильза

В биметаллическом реле температуры (рис.2.8б) в качестве чувствительного элемента используется биметаллическая пластина 1, которая при изменении температуры изгибается, замыкая или размыкая контакты 2. Зазор между контактами регулируется при помощи винта 3, что изменяет заданное значение температуры срабатывания реле. Пластины, на которых находятся электрические контакты, изолируются между собой при помощи диэлектрика 4 и помещены в гильзу 5 для защиты чувствительной части реле от действия измеряемой среды. Область применения биметаллических реле лежит от -60 до 300°C .

2.3. Поверка термометров расширения

Термометры расширения поверяются в жидкостных термостатах путем сравнения их показаний с образцовыми термометрами. При использовании метода сравнения для интервала температур от 5 до 95⁰С применяют водяные термостаты; в интервале от 100 до 300⁰С – масляные термостаты; в интервале от 300 до 500⁰С – соляные термостаты. Поверка термометров при отрицательных температурах производится в термостатах, заполняемых этиловым спиртом, охлаждаемых твердой углекислотой или жидким воздухом.

В качестве образцовых приборов для поверки термометров применяют образцовые ртутные стеклянные термометры в температурном интервале от минус 30 до 300⁰С, а при более низких температурах и свыше 300⁰С – образцовые платиновые термометры сопротивления.

Число поверяемых точек должно быть не меньше трех, помимо точек 0 и 100⁰С, поверка которых является обязательной для всех термометров, имеющих их на шкале.

При поверке манометрических термометров их закрепляют на вертикальной стойке, а термобаллон полностью погружают в термостат. Перед поверкой манометрический термометр должен быть отрегулирован, для чего его термобаллон погружают в сосуд с тающим льдом или в термостат с температурой, равной любой оцифрованной отметке шкалы. После этого с помощью корректора нуля устанавливают стрелку термометра на соответствующую этой отметке шкалы температуру.

Поверка показаний манометрических термометров производится не менее чем в трех точках, соответствующих началу, середине и концу шкалы. Поверка приборов производится в одних и тех же точках сначала при повышении, затем при понижении температуры термостата.

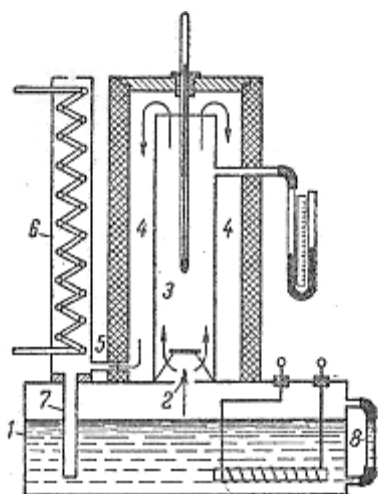


Рис. 2.9 - Водяной кипятильник (гипсометр)

Поверка нулевой точки

осуществляется при помощи сосудов Дьюара, заполняемых мелко раскрошенным льдом и дистиллированной водой. При этом резервуар и часть шкалы с отметкой «0» стеклянного жидкостного термометра должны быть погружены в тающий лед. Положение нулевой точки шкалы у поверяемых термометров производится

до и после их поверки в термостате и определяется как среднее значение после четырехкратного измерения до и после нагревания.

Поверка точки 100°C осуществляется в водяных кипятильниках (гипсометрах), схема которого приведена на рис. 2.9.

Кипятильник состоит из сосуда 1, наполненного на $2/3$ объема дистиллированной водой. С помощью электрического нагревателя вода в сосуде нагревается до кипения. Пар, образующийся при кипении, через отверстие 2 поступает во внутренний цилиндр 3. Поднимаясь по этому цилиндру, пар через верхнюю часть его поступает в кольцевое пространство 4 и отсюда через трубку 5 проходит в холодильник 6, где конденсируется и стекает по трубке 7 в сосуд 1. Для наблюдения за уровнем воды в сосуде предусмотрено водомерное стекло 8. Избыточное давление в цилиндре 3 измеряют U-образным манометром в миллиметрах водяного столба. Температура кипения воды, в зависимости от атмосферного (барометрического) давления, определяется по формуле:

$$t_K = 100 + 0,037 (h_n - 960), \quad (2.10)$$

где h_n - давление насыщенного водяного пара в кипятильнике, мм. рт. ст.

Поверяемые термометры погружаются в цилиндр 3 через отверстие в крышке так, чтобы у лабораторных термометров мениск жидкости в капилляре

не выступал более, чем на 5 мм, а у технических термометров полностью погружается только нижняя часть (хвостовик). Термометры должны находиться в парах кипящей воды не менее 15-20 мин, после чего производятся отсчеты: барометрического давления по ртутному барометру с точностью до 0,1 мм рт. ст.; температуры барометра; избыточного давления по U-образному манометру; показаний поверяемых термометров. Число отсчетов должно быть не менее пяти с интервалами через одну минуту. Среднее из отсчетов принимается за действительную величину показаний термометра.

Поверка в термостатах. На рис. 2.10 представлен термостат для поверки термометров путем сравнения их показаний с показаниями образцовых термометров в интервале температур от +5 до +300 °С. Термостат состоит из цилиндрического сосуда 1 с приваренным дном и фланцем 2. В дно сосуда вварены три трубки; одна, проходящая по оси сосуда, служит для вывода оси мешалки 3, вторая, находящаяся у стенки сосуда, предназначена для автоматического слива излишка жидкости, получающегося при ее расширении от нагревания, и третья - для спуска жидкости из сосуда. Сосуд термостата имеет две крышки 4 и 5 с отверстиями для погружения термометров. К крышке 4 прикреплен цилиндр 6, не достигающий до дна и до крышки сосуда. Этот цилиндр предназначен для лучшей циркуляции жидкости внутри сосуда. Для уменьшения тепловых потерь между стенками сосуда, дном и кожухом 7 используется теплоизолирующий материал.

Нагрев рабочей жидкости в термостате осуществляется электрическим нагревательным элементом типа ТЭН. Температура же регулируется с помощью реостата, включенного в цепь нагревателя. К источнику питания подключен также электродвигатель мешалки.

Термостат для поверки термометров в интервале температур от 5 до 95 °С наполняется водой, а в интервале от 100 до 300 °С наполняется сухим маслом с температурой вспышки не ниже 320 °С, например, маслом марки «Валор».

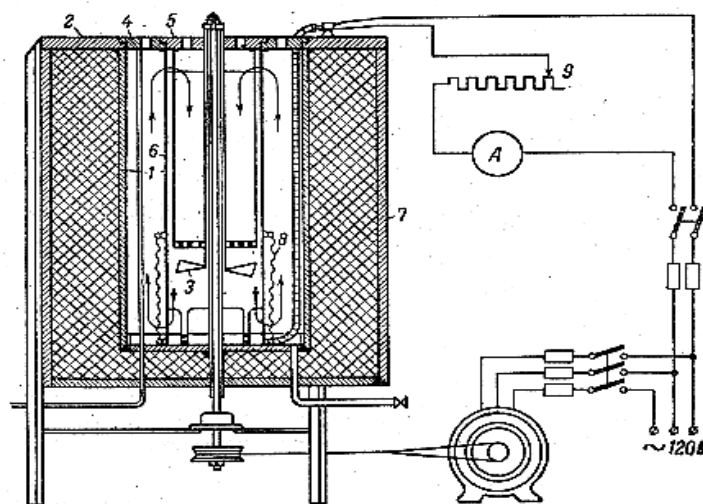


Рис.2.10 - Схема термостата для поверки термометров

Для поверки термометров в интервале температур от 300 до 500 °С применяют термостат, заполняемый смесью солей: 45% NaNO_3 + 55% KNO_3 . Смесью указанного состава плавится при температуре около 200 °С и пригодна для нагрева до +630 °С. Соляной термостат отличается от описанного выше термостата главным образом иным устройством обогрева. Кроме того, внутренний цилиндр и другие детали изготавливаются из более толстого металла. Электрический нагревательный элемент термостата из нихромовой проволоки расположен не внутри сосуда, а наматывается на его внешней поверхности. Сверху нихромовая проволока покрывается шамотом. Нагреватель питается от сети переменного тока напряжением 220 в. Мощность нагревателя около 5 кВт.

Поверяемые термометры погружают в водяной и масляный термостаты через отверстия в крышках так, чтобы нижняя часть технических термометров была погружена полностью, а у образцовых и лабораторных термометров выступающий над крышкой столбик жидкости во время отсчета показаний не превышал 5 мм. В соляной термостат термометры погружаются аналогично предыдущему, но лишь после того, как расплавится соль. Термометры в термостатах должны располагаться в следующем порядке: сначала образцовый, а потом поверяемые.

По окончании загрузки термометров в термостат включают мешалку (в водяном термостате, если температура воды в нем слишком высока, то первую точку получают путем добавления в термостат льда или холодной воды). Достигнув требуемой температуры, отсчитывают показания образцового и поверяемых термометров. Число таких отсчетов должно быть не менее четырех. Из полученных отсчетов температуры вычисляется средняя арифметическая величина для каждого термометра и округляется до десятой доли цены деления.

Как было сказано выше, для поверки термометров ниже 0°C применяют термостаты, наполняемые этиловым спиртом или другими жидкостями, охлаждаемыми твердой углекислотой или жидким воздухом. Один из способов охлаждения жидкости в таких термостатах заключается в использовании медной U-образной шины, погружаемой одним концом в сосуд термостата, а другим концом в другой металлический термостат, заполненный смесью твердой углекислоты со спиртом.

Регулировка температуры в термостате производится путем изменения глубины погружения U-образной шины, а для более тонкой регулировки, в тех случаях, когда отвод тепла по шине слишком велик, применяется электрический нагреватель, снабженный регулировочным реостатом. Такой способ регулировки температуры позволяет поддерживать в термостате с этиловым спиртом любую температуру в интервале от минус 60 до 0°C . Этиловый спирт перед заполнением термостата предварительно должен быть охлажден до требуемой температуры в специальном сосуде, установленном в вытяжном шкафу, с помощью твердой углекислоты, засыпаемой непосредственно в спирт.

Поверку термометров при отрицательных температурах также можно производить при помощи охлаждающих смесей. Эти смеси получают путем смешения чистого льда с различными солями, которые указаны в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Соотношение солей со льдом

Применяемая соль	Количество соли на 1 кг льда, г	Получаемая температура, °С
Азотнокислый калий	130	- 2,9
Хлористый калий	300	- 10,6
Хлористый аммоний	250	- 15,0
Хлористый натрий	330	- 21,2
Хлористый кальций	2000	- 35,0

2.4. Термоэлектрический метод измерения температур

Термоэлектрический метод измерения температур основан на функциональной зависимости термоэлектродвижущей силы (термо-э.д.с.) от температуры. Термометры, в которых реализуется данный принцип, обычно состоят из чувствительного элемента, представляющего два спаянных разнородных металла (термопара), и электроизмерительного прибора. Данные термоэлектрические термометры используются для измерения температур в диапазоне от минус 200 до 2500 °С.

К достоинствам термоэлектрических термометров можно отнести высокую точность, возможность отдельной градуировки датчика температуры и измерительного прибора, возможность централизованного контроля температуры, измеряемой несколькими датчиками, а также записи температуры на самопишущих приборах и дистанционной передачи информации. Недостатком термоэлектрического метода является влияние агрессивных сред на термопары с ростом температуры, что снижает срок их службы.

2.4.1. Теоретические основы термопар

В основу измерения температур с помощью термопар заложено физическое явление, открытое Зеебеком в 1821 году, возникновения электрического тока в цепи, составленной из различных двух проводников и температур в местах их присоединения.

Рассмотрим электрическую цепь, приведенную на рис.2.11, состоящую из проводников А и В (например, меди и платины). При подогреве спая 1 в цепи появляется электрический ток, который направлен от платины В к меди А, а в

холодном спае 2 – от меди к платине. При подогреве спая 2 ток меняет свое направление. При этом электродвижущая сила обусловлена неодинаковостью температур в спаях 1 и 2.

Механизм возникновения термо-э.д.с. основан на учении о наличии свободных электронов в металлах. Так как в различных металлах плотность свободных электронов неодинакова, то электроны из области с большей плотностью будут проникать в область с меньшей плотностью. Вследствие этого в местах соприкосновения двух разнородных металлов электроны, например, в спаях 1 будут диффундировать из проводника А в проводник В в большем количестве, чем обратно из металла В в металл А. Поэтому проводник А будет заряжаться положительно, а металл В – отрицательно. При таком состоянии между проводниками А и В возникает некоторая разность потенциалов (динамическое равновесие).

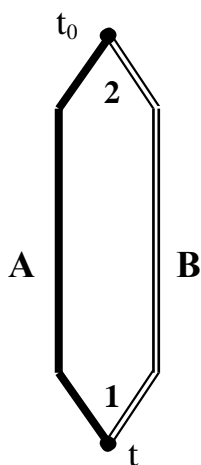


Рис.2.11 – Термоэлектрическая цепь из двух проводников

Кроме того, термоэлектрический ток возникает и в замкнутом однородном проводнике, если имеется температурный градиент, т.к. в любом, даже разомкнутом, проводнике, концы которого имеют различную температуру, появляется разность потенциалов.

Принимая во внимание оба этих фактора, выражение для результирующей термо-э.д.с в рассматриваемой

электрической цепи может быть записано на основании второго закона Кирхгоффа следующим образом:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0), \quad (2.11)$$

где e – э.д.с. в соответствующих точках контакта проводников.

При перемене порядка индексов А и В в точках контактов, знак перед символом e должен быть изменен на противоположный. Тогда, уравнение (2.11) может быть представлено в следующем виде:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), \quad (2.12)$$

Таким образом, термо-э.д.с., получаемую в цепи из двух разнородных проводников при разных температурах спаев, можно определить как разность э.д.с., развиваемую на этих спаях.

Поддерживая температуру спая 2 постоянной, полагая $t_0 = \text{const}$, то значение $e_{AB}(t_0) = C$, а уравнение (2.12) может быть записано в следующем виде:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - C = \varphi(t). \quad (2.13)$$

Выражение (2.13) носит название градуировочной зависимости термопары и получается на основе экспериментальных данных. Обычно при градуировке термопар значение $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Термо-э.д.с., развиваемая термопарами для различных материалов невелика и составляет 0,01-0,07 мВ/град, и измеряется при помощи милливольтметров и потенциометров. Различные схемы подключения термопары к измерительному прибору представлены на рис. 2.12.

В первом случае (рис.2.12, а) у термоэлектрического термометра будет три конца: рабочий 1, погружаемый в измерительную среду, и свободные 2 и 3, температура которых стабилизируется и к которым подключается измерительный прибор. Во втором случае (рис.2.12, б) у термометра будет четыре конца: рабочий 1, свободный 2 и нейтральные 3 и 4, которые могут иметь любую, но одинаковую температуру t_1 .

Для увеличения чувствительности термоэлектрического термометра термопары включаются последовательно в батарею (рис.2.12, в), при этом свободные концы 2 термопар должны иметь одинаковую температуру, а результирующий сигнал батареи будет равен сумме отдельных сигналов.

Для измерения разности температур при помощи термоэлектрического термометра применяется дифференциальная схема включения термопар (рис.2.12, г), при котором две термопары включаются встречно и измеряют различные температуры t_1 и t_2 , а их свободные концы 3, 4 и 5 должны иметь также одинаковую температуру.

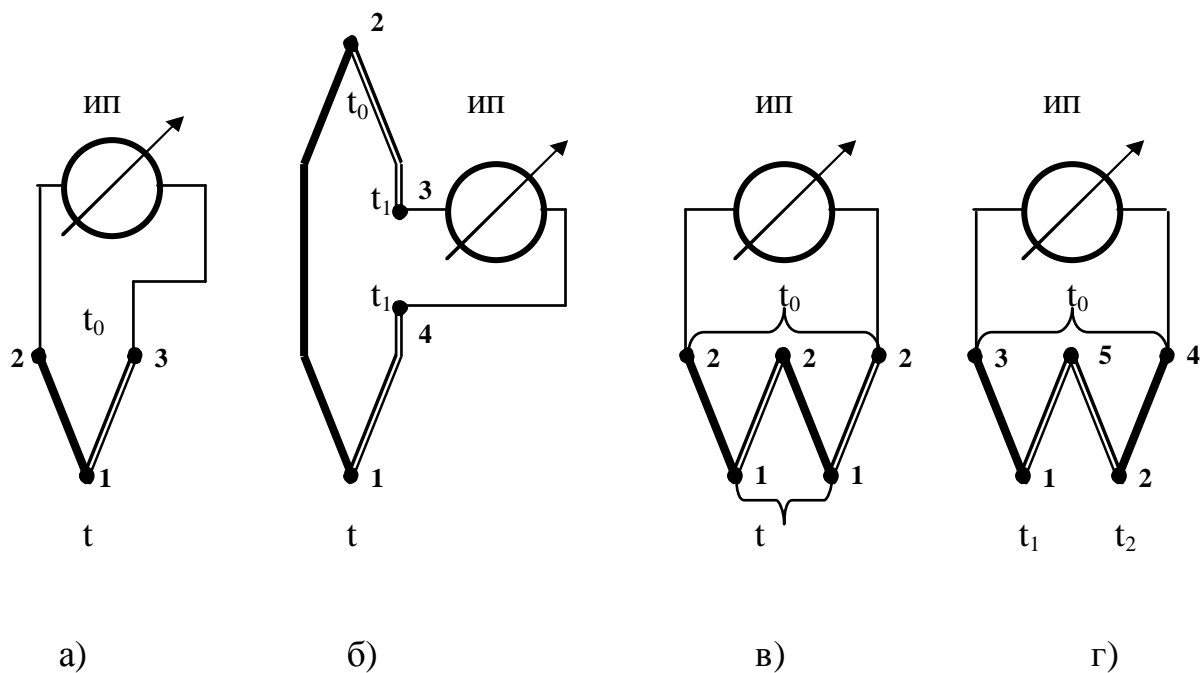


Рис.2.12 - Подключение термопар к измерительным приборам:
а- включение в спай термопары; б- включение термоэлектрод термопары;
в- батарейное включение термопар; г- дифференциальное включение термопар

При измерении температуры в практических условиях температура свободных концов термометра в большинстве случаев не равна 0°C , которая используется при градуировке, что требует введения поправки в измерения на температуру свободных концов.

Пользуясь уравнением (2.12), определим величину поправки $\Delta E(t, t'_0)$:

$$\Delta E(t, t'_0) = E_{AB}(t, t_0) - E_{AB}(t, t'_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) - e_{AB}(t) + e_{AB}(t'_0) = e_{AB}(t'_0) - e_{AB}(t_0).$$

После проведения преобразований с учетом поправки уравнение (2.12) примет вид:

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t'_0) + E_{AB}(t'_0, t_0). \quad (2.14)$$

Здесь t'_0 – температура свободных концов термопары.

Из этого уравнения следует, что увеличение температуры свободных концов термопары уменьшает его выходную термо-э.д.с. на значение, равное $E_{AB}(t'_0, t_0)$, т.е. сигнала от такой же термопары с температурами рабочего и свободного концов, равных соответственно t'_0 и t_0 .

Пример 2.3. Определить температуру при измерении термоэлектрическим термометром, если его показания составляют 5,5 мВ, а температура свободных концов равна 50⁰С. По градуировочной кривой, приведенной на рис.2.13, определяем температуру,

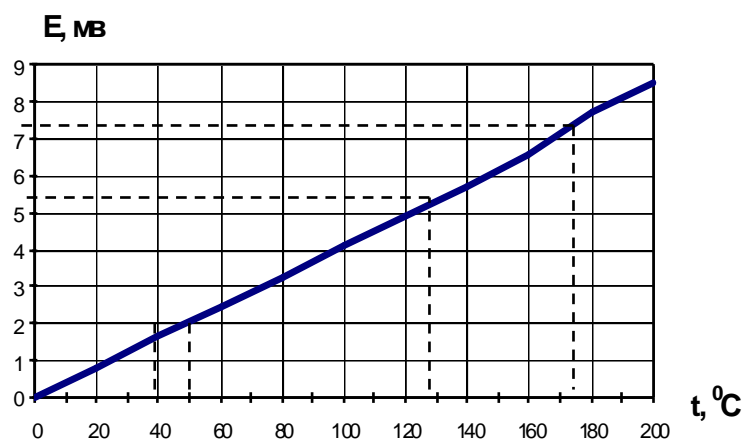


Рис. 2.13 – Градуировочная характеристика термопары

соответствующую 5,5 мВ, которая соответствует 130⁰С. Эти показания будут справедливы при температуре свободных концов 0⁰С.

По градуировочной характеристике определим термо-э.д.с., которую развила бы данная термопара при температуре 50⁰С, что составляет 2 мВ. Тогда, в соответствии с выражением (2.13) получаем: $E(t, t_0) = E(130, 0) +$

$E(50, 0) = 5,5 + 2 = 7,5$ мВ. Далее по градуировочной кривой определяем, что значение термо-э.д.с., равное 7,5 мВ, соответствует температуре рабочего конца термопары $t = 175$ °С. Следовательно, в данных условиях температура измеряемой среды равна 175 °С.

Для замкнутой цепи, состоящей из трех различных проводников А, В и С (см. рис. 2.14), когда температуры мест их соединения одинаковы, сумма контактных термо-э.д.с. в силу закона Вольты будет равна нулю, т.е.

$$e_{AB}(t) + e_{BC}(t) + e_{CA}(t) = 0 \quad (2.15)$$

Из этого также следует, что $e_{AB}(t) = -e_{BC}(t) - e_{CA}(t)$

или

$$e_{AB}(t) = e_{AC}(t) + e_{CB}(t), \quad (2.16)$$

Таким образом, если известна контактная термо-э.д.с. двух проводников по отношению к третьему, то тем самым определяется контактная термо-э.д.с. между первыми двумя.

Такое положение справедливо для

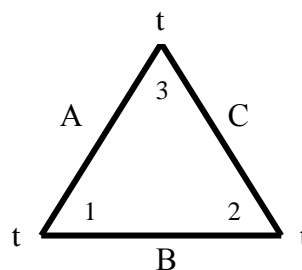


Рис. 2.14. - Цепь из трех термоэлектродов

замкнутой цепи, состоящей из любого количества проводников, тогда при одинаковой температуре мест их соединения справедливо соотношение:

$$e_{AB}(t) + e_{BC}(t) + \dots + e_{n-1,n}(t) + e_{n,A}(t) = 0. \quad (2.16)$$

2.4.2. Определение термо-э.д.с. термопар из различных материалов

На основании закона Вольты, если известны термо-э.д.с. для различных материалов M_i в паре с платиной Pt, то можно определить термо-э.д.с. для любой комбинации этих материалов между собой для определенных температур рабочего спая t и свободных концов $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Пусть известна термо-э.д.с. для двух проводников M_1 и M_2 по отношению к платиновому термоэлектроду Pt при температуре рабочего спая t и свободных концов t_0 . Тогда можно записать следующие два уравнения в соответствии с уравнением (2.12):

$$E_{M_1, Pt}(t, t_0) = e_{M_1, Pt}(t) - e_{M_1, Pt}(t_0),$$

$$E_{M_2, Pt}(t, t_0) = e_{M_2, Pt}(t) - e_{M_2, Pt}(t_0).$$

Вычитая почленно из первого уравнения второе и принимая во внимание соотношение (2.15), получим:

$$E_{M_1, Pt}(t, t_0) - E_{M_2, Pt}(t, t_0) = e_{M_1, Pt}(t) - e_{M_2, Pt}(t) - e_{M_1, Pt}(t_0) + e_{M_2, Pt}(t_0)$$

или

$$E_{M_1, Pt}(t, t_0) - E_{M_2, Pt}(t, t_0) = e_{M_1, M_2}(t) - e_{M_1, M_2}(t_0),$$

откуда

$$E_{M_1, Pt}(t, t_0) - E_{M_2, Pt}(t, t_0) = E_{M_1, M_2}(t, t_0). \quad (2.17)$$

Таким образом, если известна термо-э.д.с. двух различных металлов по отношению к третьему (платине), то термо-э.д.с., развиваемая термопарой, состоящей из этих металлов, определится как разность термо-э.д.с. двух исходных термопар.

Исходя из уравнения (2.17), очевидно, что металл 1 является положительным электродом новой термопары, а металл 2 – отрицательным. Кроме того, если металл 2 по отношению к платине является отрицательным термоэлектродом, то результирующий сигнал термопары, состоящей из металлов 1 и 2, будет большим при одном и том же значении температур горячего спая и свободных концов.

Этот способ определения термо-э.д.с. для различных металлов применяется при подборе и комплектовании термоэлектрических термометров из благородных, а, следовательно, дешевых металлов.

Термо-э.д.с. для различных металлов и сплавов, развиваемая с платиновым термоэлектродом при температуре рабочего спая $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре свободных концов $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, приведена в таблице 2.8.

Пример 2.4. Определить термо-э.д.с. хромель-копелевой термопары, пользуясь данными таблицы 2.8, при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Термо-э.д.с., развиваемая хромелевым электродом с платиной составляет $+2,71\text{ мВ}$, а копелевого электрода с платиной – минус 4 мВ . Воспользовавшись уравнением (2.17), получаем: $E_{ХП}(100, 0) - E_{КП}(100, 0) = E_{ХП}(100, 0) = 2,71 - (-4) = 6,71\text{ (мВ)}$.

Пример 2.5. Подобрать термопару из благородных металлов для длительного измерения температуры отходящих газов турбины с температурой до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также определить значение термо-э.д.с. при температуре свободных концов выбранной термопары $t_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, при допущении линейности градуировочной характеристики.

По данным таблицы 2.8 в качестве термоэлектродов из благородных металлов, длительно выдерживающих заданную рабочую температуру, являются: алюмель, нихром, никель и хромель. В качестве положительного электрода выбираем хромель ($E_{ХП} = 2,71\text{ мВ}$), а в качестве отрицательного – никель ($E_{НП} = -1,5\text{ мВ}$). По уравнению (2.17) термо-э.д.с. хромель-никелевой термопары при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ составит:

$E_{ХН}(100, 0) = E_{ХП}(100, 0) - E_{НП}(100, 0) = 2,71 - (-1,5) = 4,21\text{ (мВ)}$ – градуировочная зависимость.

Принимая во внимание допущение о линейности характеристики термопары, определяем ее термо-э.д.с. при рабочей температуре $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре свободных концов $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$E_{ХН}(700, 0) = 29,47\text{ (мВ)}.$$

Вводя поправку на температуру свободных концов выбранной термопары, определим методом интерполяции ее термо-э.д.с. при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$E_{ХН}(25, 0) = \frac{4,21}{100 - 0} \cdot 25 = 1,06\text{ (мВ)}$$

Следовательно, в рабочих условиях термо-э.д.с. выбранной термопары составит:

$$E_{ХН}(700, 25) = E_{ХН}(700, 0) - E_{ХН}(25, 0) = 29,47 - 1,06 = 28,41\text{ (мВ)}.$$

Таблица 2.8 - Термо-э.д.с. металлов и сплавов с чистой платиной

при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Наименование металла (сплава)	Обозначение (состав)	Термо-э.д.с., мВ	Температура применения, $^{\circ}\text{C}$		Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$
			Длитель- ное	Кратковре- менное	
Алюминий	Al	+0,40	-	-	658
Алюмель	95%Ni + 5%(Al, Si, Mg)	-1,02 ÷ -1,38	1000	1250	1450
Вольфрам	W	+ 0,79	2000	2500	3367
Железо химии- чески чистое	Fe	+ 1,8	600	800	1528
Железо поделочное	Fe	+ 1,87	600	800	1400
Золото	Au	+ 0,8	-	-	1063
Константан	60% Cu + 40% Ni	- 3,5	600	800	1220- 1280
Копель	56% Cu + 44% Ni	- 4,0	600	800	1250
Кобальт	Co	-1,68 ÷ -1,76	-	-	1478
Молибден	Mo	+ 1,31	2000	2500	3000
Медь химически чистая	Cu	+ 0,76	350	500	1083
Медь проводниковая	Cu	+0,75	350	500	-
Манганин	84% Cu +13% Mn + 2% Ni +1%Fe	+0,8	-	-	910
Нихром	80% Ni + 20% Cr	+1,5 ÷ +2,5	1000	1100	1500
Никель	Ni	- 1,5 ÷ -1,54	1000	1100	1455
Платина	Pt	± 0,00	1300	1600	1779
Платинородий	90%Pt+ 10% Rh	+ 0,64	1300	1600	-
Платиноиридий	90% Pt +. 10% Ir	+ 1,3	1000	1200	-
Ртуть	Hg	+ 0,04	-	-	-38,7
Сурьма	Sb	+ 4,86	-	-	630,5
Свинец	Pb	+ 0,44	-	-	327
Серебро	Ag	+ 0,72	600	700	960,5
Хромель	90%Ni+ 10%Cr	+2,71÷+3,13	1000	1250	1450
Цинк	Zn	+0,7	-	-	419,5

2.4.3. Стандартные промышленные термопары

В настоящее время в промышленности используется достаточно большое разнообразие термопар, состоящих из различных термоэлектродов. К термоэлектродным материалам при изготовлении и выборе термопары для применения в тех или иных условиях измерения предъявляется ряд требований: механическая прочность и жаростойкость; химическая стойкость; стабильность и линейность градуировочной характеристики и высокая чувствительность. Например, с ростом температуры уменьшается механическая прочность термоэлектродов и увеличивается химическая активность соприкасающихся электродов. Термопары платиновой группы хорошо работают в нейтральных и окислительных средах, но быстро разрушаются в восстановительной среде (присутствие водорода) при температурах более 500 °С. Термопары же на основе молибдена, вольфрама, рения и их сплавов, наоборот, хорошо работают в восстановительных средах и быстро выходят из строя в окислительных средах.

При выборе термоэлектродных материалов учитывается также технология их изготовления, стоимость и возможность получения взаимозаменяемых по термоэлектрическим свойствам материалов (см. табл. 2.8). Надежная работа термопар в промышленных условиях определяется не только качеством и свойством термоэлектродных материалов, но и качеством конструкции арматуры термоэлектрического термометра. Принимая во внимание то, что термо-э.д.с., развиваемая большинством термопар с металлическими электродами невелика, предпочтение следует отдавать термопарам, имеющим при прочих равных условиях большую термо-э.д.с. Это позволяет использовать менее чувствительные и, следовательно, более надежные и недорогие измерительные приборы.

Наиболее распространенными термопарами, применяемыми в термоэлектрических термометрах, являются термопары из благородных и неблагородных металлов.

К термопарам из благородных металлов относятся платинородий-платиновые (ТПП), а также платинородий-платинородиевые (ТПР), которые являются лучшими по точности и воспроизводимости термо-э.д.с. По назначению эти термометры подразделяются на эталонные, образцовые, рабочие повышенной точности и технические. Характеристики эталонных и образцовых термометров платиновой группы приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 - Характеристики термопар платиновой группы

Обозначение термометра	Назначение термометров	Диапазон измерения, °С	Нормируемые погрешности, °С ¹
ТПП-Э	Рабочие эталоны	630,7-1064,4	$\sigma = 0,1$
ТПП-О1	Образцовые 1-го разряда	300-1100	$\sigma = 0,1-0,2$
ТПП-О2	Образцовые 2-го разряда	300-1200	$\sigma = 0,2-0,5$
ТПП-О3	Образцовые 3-го разряда	300-1200	$\sigma = 0,4-1,0$
ТПР-О2	Образцовые 2-го разряда	600-1800	$\sigma = 0,25-2,5$
ТПР-О3	Образцовые 3-го разряда	600-1800	$\sigma = 0,5-3,5$
ТПП-РПТ	Рабочее повышенной точности	300-1200	$\Delta = 0,2-1,5$
ТПР-РПТ	Рабочее повышенной точности	600-1800	$\Delta = 0,4-8,0$

Термопары из неблагородных металлов широко используются для измерения температур в различных областях техники. Наибольшее внимание из них заслуживают следующие термопары: медь-копелевая; железо-копелевая; хромель-копелевая и хромель-алюмелевая. Эти термопары применяют для измерения температур жидкостей, газов, пара, поверхностей нагрева, а в ряде случаев для кратковременного измерения температуры расплавленных металлов. Термоэлектрические термометры развивают большую термо-э.д.с., чем термометры платиновой группы, и значительно дешевле их, однако получение стандартной градуировочной характеристики термопар из неблагородных металлов труднее, т.к. она зависит от состава металла и примесей в нем.

Для высоких температур применяются вольфрам-рениевая или другие тугоплавкие соединения металлов с графитом.

Указанные термопары из благородных и неблагородных металлов

¹ σ - среднее квадратическое отклонение результата измерения; Δ - абсолютная допускаемая погрешность.

являются стандартными и используются согласно их рабочим диапазонам измерения. Характеристики этих термопар приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 - Стандартные рабочие термопары с металлическими электродами

Обозначения типов термоэлектрических термометров	Наименование материалов термоэлектродов	Обозначение градуировки	Диапазон измерений при длительном ² применении, °С	Допускаемый предел измерений при кратковременном ³ применении, °С
ТПП	Платинородий (10% родия)-платина	ПП	0 ÷ 1300	1600
ТПР	Платинородий (30% родия)-платинородий (6% родия)	ПР30/6	300 ÷ 1600	1800
ТВР	Вольфрамрений (5% рения)-вольфрамрений (20% рения)	ВР5/20	0 ÷ 2200	2500
ТХА	Хромель-алюмель	ХА	-200 ÷ 1000	1300
ТХК	Хромель-копель	ХК	-200 ÷ 600	800
МК	Медь – копель	-	до +350	до +500
ЖК	Железо – копель	-	до +600	до +800

2.4.4. Устройство термоэлектрических термометров

Для защиты от механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется, электроды термоэлектрического термометра, защищенные керамической изоляцией, помещаются в специальную защитную арматуру. Схема термоэлектрического термометра приведена на рис. 2.15.

У промышленно используемых термоэлектрических термометров, применяемых для измерения температуры различных сред, арматура состоит из защитной гильзы 1, неподвижного 2 или передвижного штуцера с сальниковым уплотнением (на рис. 2.15 не показан) и головки 3, соединенной с неподвижным штуцером с помощью трубки 6 или непосредственно с гильзой при использовании передвижного штуцера. В головке, снабженной крышкой и

² Длительное применение термопары – работа ее не менее 1000 часов при изменении первоначальной градуировки не более 1%.

³ Кратковременное применение термопары – работа ее до нескольких десятков часов при изменении первоначальной градуировки не более 1%.

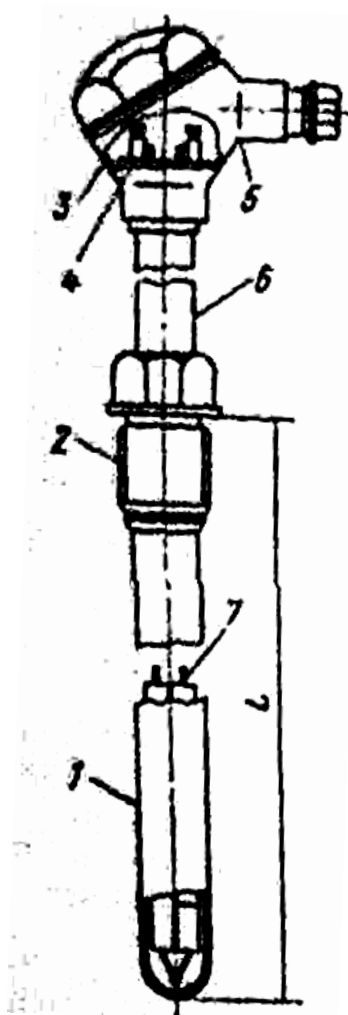


Рис. 2.15-Схема конструкции термоэлектрического термометра

патрубком 5 с сальниковым уплотнением, помещена розетка 4 из изоляционного материала с зажимами для присоединения термоэлектродов 7 и проводов, соединяющих термометр с измерительным прибором или преобразователем. Длина погружаемой (монтажной) части L в измеряемую среду выполняется различной для каждого конкретного типа термоэлектрического термометра.

Для термопар устанавливаются общие требования, которым должны удовлетворять изоляция электродов, конструкция термометров и защитная арматура, что вызвано необходимостью их надежной работы.

Эти требования сводятся к следующему:

1. Должно быть обеспечено изготовление надежного спая рабочего конца термоэлектрического термометра.
2. Необходимо обеспечить надежную электрическую изоляцию термоэлектродов термопары. При этом изоляция не должна взаимодействовать с термоэлектродами в диапазоне измеряемых температур.
3. Защитная арматура, используемая для обеспечения механической прочности термометра, должна выбираться с учетом параметров среды, ее свойств и условий измерения температуры. Защитная гильза арматуры термометров в диапазоне измеряемых температур должна быть газонепроницаемой и нечувствительной к действию резких перепадов

температуры. Материал защитной гильзы не должен загрязнять термоэлектродов термометра в интервале измеряемых температур.

4. Конструкция арматуры термоэлектрического термометра должна быть такой, чтобы его электроды не находились в механически напряженном состоянии, так как при этих условиях они быстрее изменяют первоначальные термоэлектрические свойства.
5. Головка термоэлектрического термометра должна быть снабжена надежными уплотняющими устройствами, исключающими возможность попадания во внутреннюю ее полость и в гильзу влаги и пыли.
6. Конструкция термоэлектрических термометров для измерения средних и высоких температур различных сред должна обеспечивать возможность в условиях эксплуатации свободно извлекать электрически изолированные термоэлектроды из защитной гильзы для их периодической поверки, а в случае необходимости осуществлять и их замену.
7. Конструкция гильзы термоэлектрических термометров для измерения низких температур должна обеспечивать ее герметичность.
8. Конструкция термоэлектрических термометров лабораторных (повышенной точности) должна обеспечивать возможность термостатирования свободных концов.
9. Необходимо, чтобы материал защитной гильзы обладал хорошей теплопроводностью. Конструкция термоэлектрического термометра была компактной, а теплочувствительная часть его имела как можно меньшие массу и воздушную прослойку между рабочей частью термоэлектродов и электрической изоляцией, а также защитной гильзой. Спай рабочего конца должен иметь хороший тепловой контакт с нижней частью защитной гильзы. Степень соблюдения этих условий определяет инерционность термоэлектрического термометра, характеризуемую показателем тепловой инерции ε_{∞} .

Показатель тепловой инерции ε_{∞} характеризует условия теплообмена для конкретных условий измерения и определяет тепловую инерцию выпускаемых

термопар: малоинерционные – до 5 секунд; средней инерционности – до 60 секунд; большой инерционности – до 180 секунд.

При изготовлении термопар используют различные способы выполнения горячего (рабочего) спая: путем сварки, пайки или скрутки. На рис.2.16 показаны способы изготовления рабочего конца термопары.

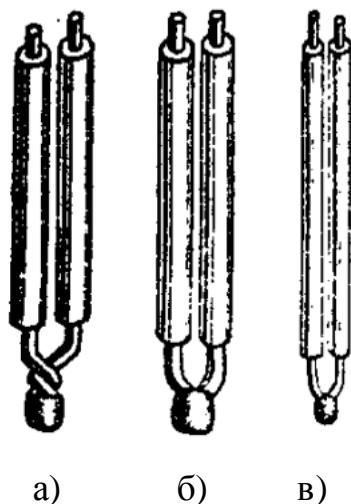


Рис. 2.16 - Способы изготовления рабочего конца термопары:
а- скрутка; б- пайка;
в- сварка.

Наибольшее распространение получил способ изготовления спая с помощью сварки, а пайку применяют только в специальных случаях. Скрутку рабочего конца часто применяют для термопар вольфрамрениевой и вольфраммолибденовой групп.

Сварку электродов термопары производят либо со скруткой термоэлектродов, так и без скрутки. Обычно скрутку делают не более двух оборотов, в противном случае спай рабочего конца может фактически находиться не в месте сварки, а на конце скрутки, где расходятся термоэлектроды. Это может привести к значительным и не поддающимся учету погрешностям при измерении температуры.

Другим вариантом изготовления спая рабочего конца является приварка электродов к дну защитной гильзы. Это позволяет уменьшить инерционность термометра, однако это не дает возможности в условиях эксплуатации производить периодическую поверку термометра, а в случае необходимости замену термоэлектродов. Это является существенным недостатком конструкции, т.к. арматура термометра имеет значительно больший срок работы, чем его термоэлектроды.

Термоэлектроды для термопар платиновой группы изготавливаются из проволоки диаметром 0,5 мм, что обеспечивает оптимальное соотношение стоимости термопар и их технических характеристик, а для термопар из

неблагородных металлов диаметр проволоки составляет 1,2 мм при длине погружаемой части от 120 до 2000 мм.

Для электрической изоляции электродов термопар, предназначенных для измерения температур до 1300°C , используются фарфоровые бусы или трубки. При измерении температур в области $1300\text{--}1900^{\circ}\text{C}$ в качестве материала изолятора используется керамика или окись алюминия. Для изоляции рабочего конца от внутренней поверхности защитной арматуры в термопарах типа ТХА и ТХК используют керамический наконечник.

Защитные гильзы термопар, применяемых в промышленных условиях, изготавливаются из нержавеющей стали марки ОХ13 или 1Х18Н9Т и имеют унифицированную конструкцию, которая приведена на рис. 2.17. Эта защитная арматура используется также и для термометров сопротивления, отличающаяся в зависимости от условного давления измеряемой среды P_y , и штуцеров.

Как отмечалось выше, при измерении температуры термоэлектрическими термометрами в промышленных условиях необходимо вводить поправку на температуру свободных концов термометра. Она может быть введена на основании расчетных данных, если их температура известна и постоянна, или автоматически.

При подключении термоэлектрического термометра к измерительному прибору свободные концы его необходимо удалять от нагретых поверхностей оборудования, в котором измеряется температура в зону, где может быть установлено термостабилизирующее оборудование или прибор, обеспечивающий автоматическое введение коррекции на температуру свободных концов. Для этого используются удлинительные провода, которые в паре между собой развивают ту же термо-э.д.с., что и рабочие термоэлектроды. Соблюдение этого условия позволяет избавиться от дополнительной погрешности, а также использовать дешевые материалы.

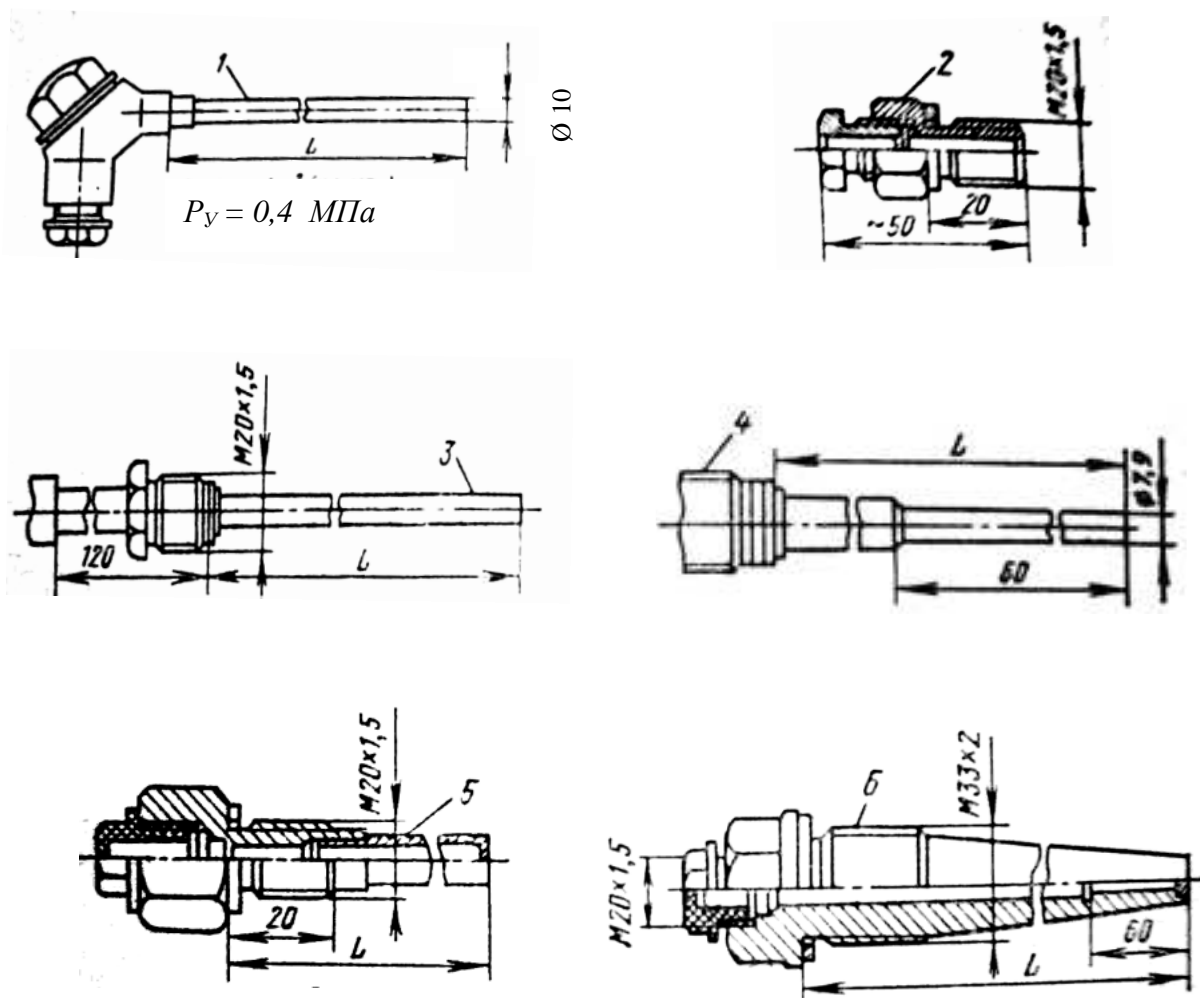


Рис. 2.17 - Унифицированная конструкция защитной арматуры термопар и термометров сопротивления:

1-гильза, 2-подвижный штуцер для измерения температуры сред с низким давлением; 3- гильза, 4- неподвижный штуцер для сред с невысоким давлением; 5- гильза с неподвижным штуцером для сред с высоким рабочим избыточным давлением; 6- гильза со штуцером для газовых и паровых сред со сверхкритическими параметрами

Эти провода для ряда электродов могут быть изготовлены из тех же материалов, что и электроды термопар, однако при применении термометров из благородных металлов экономически невыгодно ориентироваться на удлинительные провода, сделанные из того же материала. Поэтому в промышленности применяют специальные провода, используемые в соответствии с типом градуировки термопары. Основные технические

характеристики стандартных удлиняющих термопроводов приведены в таблице 2.11⁴.

К удлиняющим термопроводам не предъявляется требований по жаростойкости, т.к. они обычно эксплуатируются в диапазоне температур 60 – 80⁰С. Это позволяет считать свободными концами термоэлектрического термометра места соединения термопроводов к монтажным медным проводам или с зажимами измерительного прибора.

Таблица 2.11 - Основные характеристики стандартных термопроводов

Тип термопары	Термоэлектродные провода				Обозначение проводов	Термо-э.д.с., мВ	Допуск на отклонение термо-э.д.с. мВ
	Положительный		Отрицательный				
ТХК	Хромель	Фиолетовый	Копель	Желтый	ХК	6,95	±0,20
ТХА	Медь	Красный	Константан	Коричневый	М	4,10	±0,15
ТПП	Медь	Красный	Сплав ПП (99.4% Cu + 0,6% Ni)	Зеленый	ПП	0,64	±0,03

В некоторых случаях для термоэлектрических термометров типа ТХА применяют термоэлектродные провода с жилами из хромеля и алюмеля, а для термоэлектрических термометров типа ТВР применяют термоэлектродные провода с жилами из меди и медно-никелевого сплава (98,2% Cu + 1,8% Ni).

2.5. Измерительные приборы, применяемые с термопарами

К основным измерительным приборам, работающими совместно с термоэлектрическими преобразователями температуры, относятся различные типы переносных и стационарных милливольтметров и потенциометров,

⁴ Характеристики удлиняющих термопроводов приводятся в паре между его жилами при температуре рабочего конца 100⁰С и свободных концов при 0⁰С.

которые могут быть показывающими, автоматическими и самопишущими. При этом шкалы этих приборов градуируются для каждой конкретной градуировки термопар. Эти шкалы могут быть как двойными, так и обычными (одинарными). На двойных шкалах наносятся милливольты и соответствующие им значения температуры. На одинарных шкалах наносятся милливольты или градусы Цельсия. На промышленных стационарных измерительных приборах шкала обычно нанесена в градусах.

Основное требование, выдвигаемое к измерительным приборам, работающим в составе с термопарами – высокая чувствительность, т.к. они предназначены для измерения сигналов низкого уровня.

2.5.1. Милливольтметры

Милливольтметры, используемые для работы с термопарами, называются пирометрическими вольтметрами и представляют собой приборы магнитоэлектрической системы⁵.

Принцип действия пирометрического милливольтметра основан на взаимодействии между проводником, по которому протекает электрический ток, и магнитным полем постоянного магнита. Сила dF , действующая на находящийся в магнитном поле проводник dl , по которому протекает ток I , определяется в соответствии с выражением:

$$dF = C \cdot I \cdot dl \cdot B \cdot \sin(\alpha), \quad (2.18)$$

где C -коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения;

B - магнитная индукция, являющаяся основной характеристикой магнитного поля.

Направление этой силы определяется правилом левой руки.

Рамка выполняется из нескольких десятков или сотен последовательных витков тонкой изолированной, обычно медной, реже алюминиевой проволоки.

⁵ В настоящее время приборы магнитоэлектрической системы вытесняются цифровыми милливольтметрами и преобразователями.

Такая рамка, помещенная в магнитное поле, схематически представлена на рис. 2.18. Полость этой рамки параллельна магнитным линиям, а ее ось вращения - перпендикулярна к ним.

Ток, протекающий через рамку, вызывает появление двух сил F_1 и F_2 , которые стремятся повернуть рамку в направлении, показанном на рис.2.18. Величина сил F_1 и F_2 определяется путем интегрирования уравнения (2.18).

Если взять прямоугольную рамку, состоящую из n витков, при условии $B = \text{const}$ и $\sin(\alpha) = 1$, то

$$F = C \cdot n \cdot B \cdot I \cdot l \quad (2.19)$$

Чтобы силы F_1 и F_2 были равны, активные стороны рамки должны иметь одинаковое число витков провода. Для этого токовые вводы располагают с одной стороны рамки.

Тогда вращающий момент M , стремящийся повернуть рамку вокруг ее оси, при условии совпадения направления магнитного потока с плоскостью рамки может быть выражен следующим образом:

$$M = 2 \cdot F \cdot r = d \cdot l \cdot n \cdot B \cdot I = s \cdot n \cdot B \cdot I, \quad (2.20)$$

где r – радиус рамки, м;

$d = 2r$ – средняя ширина одного витка, м;

l – длина активной стороны каждого витка, м;

s – активная площадь обмотки рамки, м²;

n – количество витков.

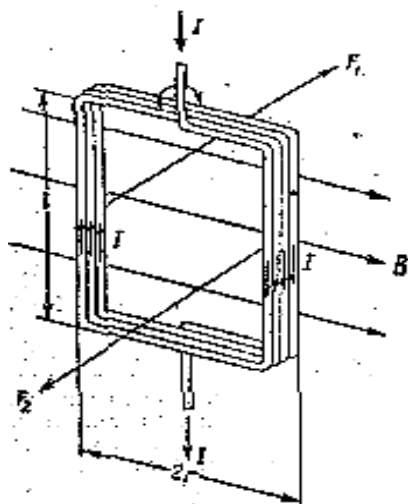


Рис.2.18 - Рамка в магнитном поле

Для того, чтобы вращающий момент не зависел от угла поворота рамки, ее помещают в радиальное магнитное поле, для чего внутри нее размещают неподвижный цилиндрический сердечник из мягкой стали. Снаружи сердечник и рамка окружены полюсными наконечниками подковообразного постоянного магнита.

В наиболее распространенных показывающих пирометрических милливольтметрах подвижная рамка

монтируется на растяжках, представляющих собой упругие нити или ленты, изготовленные из фосфористой бронзы шириной от 0,1 до 0,3 мм и толщиной 0,01 – 0,025 мм. Эти растяжки служат для подвода тока в рамку, а также создают противодействующий момент вращающему моменту рамки, линейно возрастающий с углом поворота рамки. Под действием этого момента рамка с током будет поворачиваться до тех пор, пока вращающий и противодействующий моменты не станут равными.

На рис. 2.19 представлена рамка пирометрического милливольтметра на растяжках, а на рис. 2.20 – схема измерения термо-э.д.с. милливольтметром.

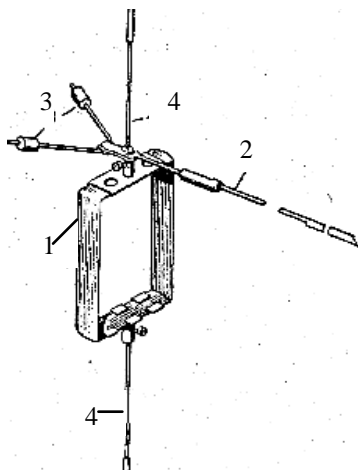


Рис. 2.19 - Рамка прибора на растяжках.
1-рамка; 2-стрелка; 3-грузики;
4- растяжки

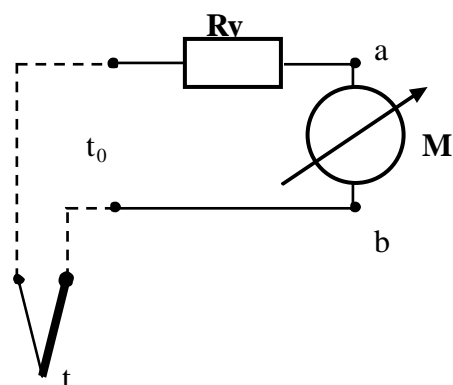


Рис. 2.20 - Схема подключения милливольтметра к термопаре

При подключении милливольтметра к термопаре (рис.2.20) в замкнутой цепи потечет ток, определяемый в соответствии с выражением:

$$I = \frac{E(t, t_0)}{R_M + R_{\Pi} + R_y}, \quad (2.21)$$

где R_M – сопротивление рамки прибора;

R_{Π} – сопротивление соединительных проводов;

R_y – добавочное манганиновое сопротивление.

Принимая во внимание, что сумма сопротивления проводов и добавочного сопротивления прибора представляют собой внешнее сопротивление $R_{вн}$, определим напряжение U_{ab} на зажимах милливольтметра:

$$U_{ab} = I \cdot R_M = \frac{E(t, t_0)}{R_M + R_{вн}} \cdot R_M \quad (2.22)$$

или

$$U_{ab} \cdot R_M + U_{ab} \cdot R_{вн} = E(t, t_0) \cdot R_M,$$

разделив данное выражение почленно на R_M , получим:

$$U_{ab} = E(t, t_0) - U_{ab} \frac{R_{вн}}{R_M} \quad (2.23)$$

Отсюда следует, что, чем больше сопротивление рамки милливольтметра, тем точнее прибор будет измерять термо-э.д.с., развиваемую термопарой, т.к. второе слагаемое в выражении (2.23) будет стремиться к нулю. Но поскольку внутреннее сопротивление рамки практически не может быть увеличено, то увеличивают добавочное манганиновое сопротивление.

Кроме того, включение манганинового резистора последовательно с сопротивлением рамки позволяет существенно снизить влияние температуры окружающего воздуха на показания милливольтметра за счет того, что температурный коэффициент сопротивления манганина близок к нулю ($\alpha = 0,6 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

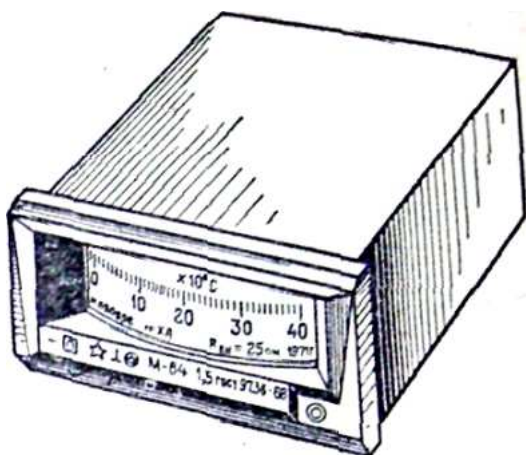


Рис. 2.21- Общий вид милливольтметра типа М- 64

В настоящее время применяются пирометрические милливольтметры как переносные (лабораторные), так и стационарные (щитовые).

На рис. 2.21 представлен общий вид узкопрофильного щитового милливольтметра типа М-64.

Переносные милливольтметры выпускаются с классами точности 0,2;

0,5 и 1,0, (типы МП-18, МП-28, МС-28 и т.д.), а щитовые, как показывающие, так и самопишущие – 0,5; 1,0; 1,5 и 2,5 (типы М-64, МР-64-02, МВР-6, МВУ-6 и т.д.).

Цифровые приборы, используемые с термопарами - приборы типа Ф-226 и А-565 с классом точности 0,1, имеющие унифицированный выходной сигнал, обеспечивающие работу их с ЭВМ.

2.5.2. Компенсационный метод измерения термо-э.д.с.

Компенсационный метод широко применяется для измерения термо-э.д.с. термоэлектрических термометров, напряжения, а также других величин, связанных с напряжением определенной зависимостью.

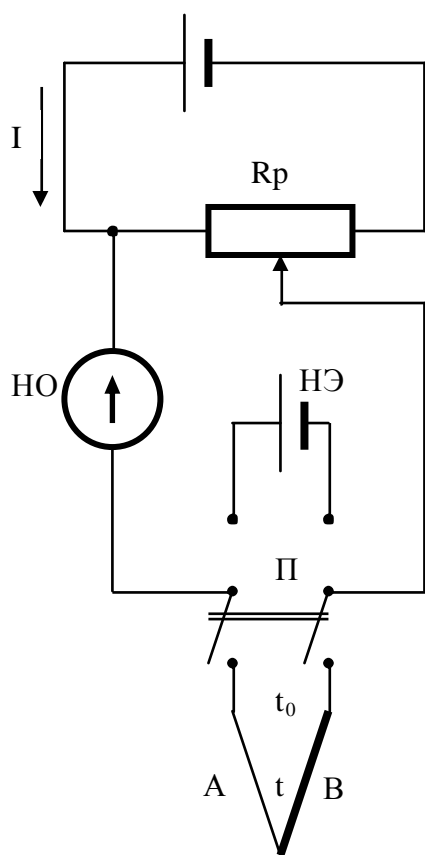


Рис. 2.22- Принципиальная схема измерения компенсационным методом

Принцип компенсационного метода основан на уравнивании (компенсации) измеряемой э. д. с. известным напряжением, получаемым от строго определенного тока, называемого обычно рабочим, на сопротивлении с известным значением.

Рассмотрим принципиальную схему, поясняющую компенсационный метод измерения термо-э.д.с, которая показана на рис. 2.22.

Уравнивающее падение напряжения создается рабочим током I на реохорде (компенсационном резисторе) R_p . При этом сопротивление компенсационной цепи должно быть неизменным, а источник питания должен

обеспечивать неизменным во время измерения рабочий ток I . Вдоль реохорда R_p перемещается скользящий контакт - движок b , который с помощью провода

соединен с одним зажимом переключателя П. К зажиму a реохорда R_p присоединен один зажим нулевого прибора НО, а второй его зажим присоединен к переключателю П. Таким образом, при помощи переключателя нулевой прибор можно включить в цепь термоэлектрического термометра АВ или нормального элемента НЭ с э. д. с. $E_{НЭ}$.

При измерении термо-э.д.с. $E(t, t_0)$ нулевой прибор включают в цепь термопары АВ и перемещают движок b до тех пор, пока указатель нулевого прибора не установится на нулевой отметке шкалы. При выполнении этого условия падение напряжения на части реохорда R_p будет равно измеряемой термо-э.д.с. В этом случае будет иметь место равенство:

$$E(t, t_0) = I \cdot R_p',$$

где R_p' - сопротивление участка цепи ab .

Включив затем нулевой прибор в цепь НЭ вместо термоэлектрического термометра необходимо установить с помощью движка b заново нулевое показание прибора. При этом сопротивление участка цепи ab примет значение R_p'' , а при поддержании постоянным рабочего тока I будет иметь место следующее равенство:

$$E_{НЭ} = I \cdot R_p''$$

Признаком уравнивания или компенсации в первом и во втором случае является отсутствие тока в цепи нулевого прибора.

Разделив почленно эти уравнения, получим:

$$\frac{E(t, t_0)}{E_{НЭ}} = \frac{R_p'}{R_p''}. \quad (2.24)$$

Откуда

$$E(t, t_0) = E_{НЭ} \cdot \frac{R_p'}{R_p''}. \quad (2.25)$$

Таким образом, измеряемая термо-э.д.с. сравнивается с образцовой мерой – напряжением нормального элемента. Этот принцип измерения термо-э.д.с. положен в основу работы потенциометров всех типов с постоянной силой рабочего тока. Общий вид переносного потенциометра показан на рис.2.23.

Нормальные элементы, используемые в данном методе измерения, представляют собой обратимые высокостабильные гальванические элементы, выполненные из химически чистых веществ и в зависимости от концентрации электролита подразделяются на насыщенные и ненасыщенные. Основные технические характеристики нормальных элементов приведены в таблице 2.12, а схема его устройства на рис. 2.24.

Таблица 2.12 - Технические характеристики нормальных элементов

Тип НЭ	Класс точности	Значение э.д.с. при температуре 20 ⁰ С, В		нестабильность э.д.с., мкВ, не более		Рабочая температура,
		При выпуске из производства	При эксплуатации	За 1 год	За три дня	
Насыщенный	0,0005	От 1,018590 до 1,018700	От 1,018540 до 1,018730	5,0	1,0	19 - 21
	0,001			10,0	2,0	18 - 22
	0,002			20,0	4,0	18 - 24
	0,005			50,0	10,0	10 - 40
Ненасыщенный	0,002	От 1,019000 до 1,019600	От 1,018800 до 1,019600	20,0	4,0	10 - 40
	0,005			50,0	10,0	10 - 40
	0,01			100,0	20,0	5 - 40
	0,02			200,0	40,0	5 - 50



Рис. 2.23 - Общий вид переносного потенциометра типа ПП-63.

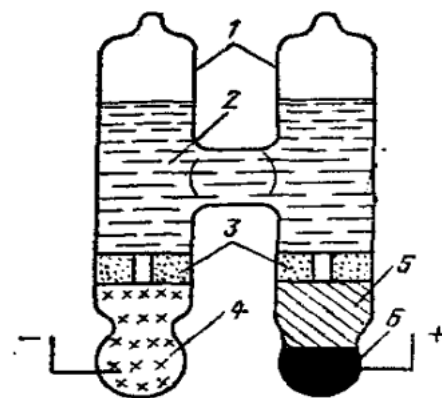


Рис. 2.24 - Схема устройства ненасыщенного нормального элемента с жидким электролитом:

1- стеклянная оболочка Н-образной формы; 2- ненасыщенный раствор сульфата кадмия; 3- кольцо защитное; 4- амальгама кадмия; 5- сульфат ртути; 6- ртуть

2.5.3. Автоматические потенциометры

Автоматические потенциометры широко применяются в различных отраслях промышленности для измерения и записи температуры в комплекте с термоэлектрическими термометрами. Они одновременно могут быть использованы для измерения, записи и сигнализации или регулирования температуры. В этом случае потенциометры снабжаются дополнительным устройством для сигнализации или регулирования температуры. Некоторые типы одноканальных потенциометров имеют в своем составе передающие преобразователи для дистанционной передачи измерительной информации. Автоматические потенциометры находят также широкое применение и для измерения других технологических параметров (давления, расхода и т. д.), которые могут быть преобразованы в сигналы напряжения постоянного тока.

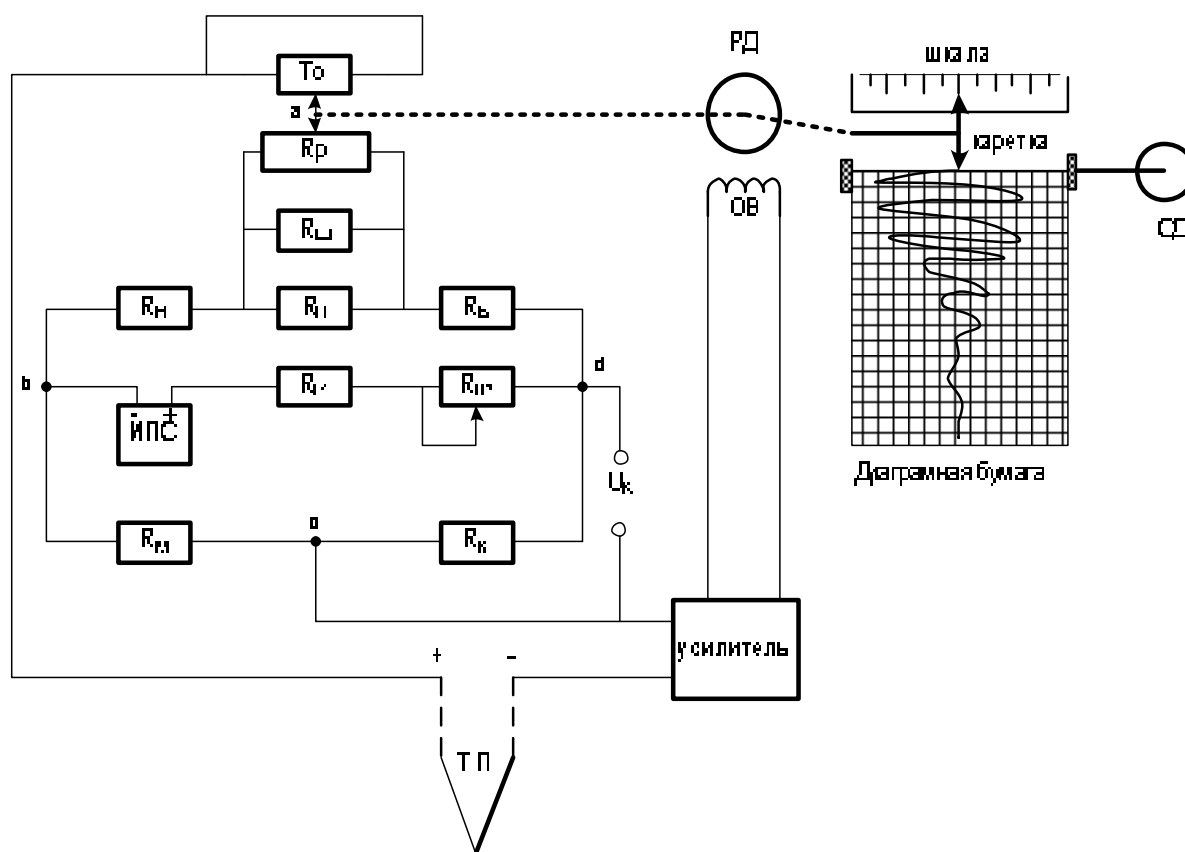


Рис.2.25 - Типовая принципиальная схема автоматического потенциометра
РД- реверсивный двигатель; СД- синхронный двигатель; ТП- термopаpa;
ОВ- обмотка возбуждения реверсивного двигателя. Т_О- токоотборник

Отличительной особенностью автоматических потенциометров от переносных и лабораторных является то, что регулирование компенсирующего

напряжения, а следовательно и уравнивание измеряемой термо-э.д.с. от термопары осуществляется перемещением движка по калиброванному реохорду не вручную, а при помощи непрерывно действующего автоматического следящего устройства.

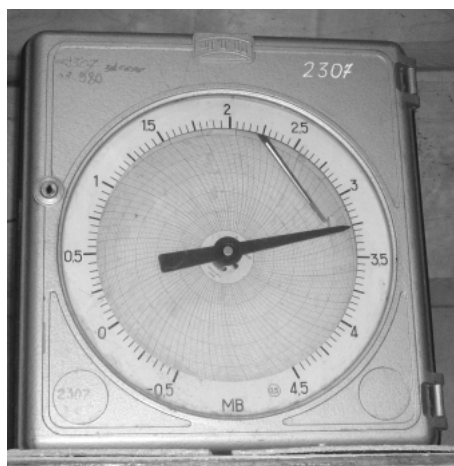
Типовая схема автоматического потенциометра со следящей системой приведена на рис.2.25.

В автоматических потенциометрах используется компенсационная мостовая измерительная схема, состоящая из ряда резисторов и термоэлектрического преобразователя температуры ТП. В диагональ питания мостовой схемы bd включен источник стабилизированного питания ИПС и резисторы R_{I1} и R_{I2} для ограничения и регулирования рабочего тока моста при градуировке или поверке прибора. В измерительную диагональ ac мостовой схемы включены термопара и токоотборник, воспринимающий определенную часть сопротивления реохорда R_p , а также усилитель постоянного тока, выполняющий функцию нуля органа. При равенстве компенсирующего напряжения, снимаемого с реохорда и термо-э.д.с. от термопары, мостовая схема находится в равновесии и на вход усилителя поступает сигнал разбаланса, равный нулю; при этом исполнительный механизм прибора, представляющий собой реверсивный двигатель, находится в покое. В случае изменения термо-э.д.с., вызванное изменением измеряемой температуры, на выходе мостовой схемы появляется напряжение небаланса той или иной полярности, которое приводит к вращению ротора реверсивного двигателя. Выходной вал реверсивного двигателя через систему кинематической передачи перемещает движок реохорда измерительной схемы, изменяя компенсирующее напряжение до тех пор, пока оно не уравнивает измеряемую термо-э.д.с. При этом одновременно приводится в движение каретка с указателем и пером (печатающим устройством в многоточечных приборах), фиксируя значение измеряемой температуры по шкале прибора и на диаграммной бумаге. Любые последующие изменения измеряемой термо-э.д.с. снова приводят в действие реверсивный двигатель, который с помощью движка реохорда измерительной

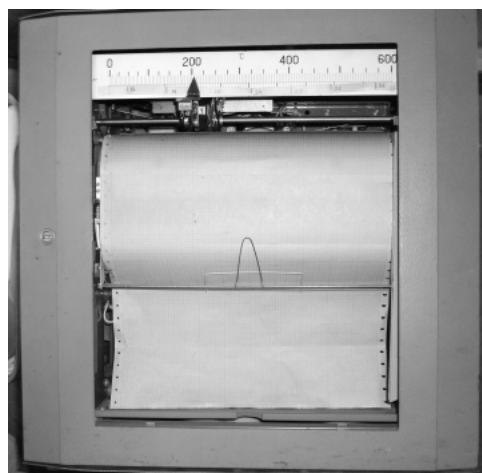
схемы изменяет компенсирующее напряжение до значения, равного новому значению измеряемой термо-э.д.с., и приводит в движение каретку, фиксируя новое значение измеряемой температуры.

Все резисторы измерительной схемы автоматического потенциометра для температурной стабилизации изготавливаются из манганиновой проволоки, а дополнительный резистор R_M , служащий для автоматической коррекции температуры свободных концов термопары – из медной проволоки. В потенциометрах, работающих с термопарами градуировок ПП, ХА, ХК и др., кроме ПР_{30/6}, этот резистор находится в непосредственной близости с термоэлектродными проводами.

Реохорд автоматического потенциометра является ответственным узлом, основным элементом которого является рабочая спираль R_P и вспомогательная спираль – токоотвод T_O , изготавливаемые из палладиево-вольфрамовой проволоки, обладающей высокой износостойкостью и надежностью.



а)



б)

Рис. 2.26 - Промышленные автоматические потенциометры:
а – ЭПД- 0,7; б- КСП- 4.

На схеме, приведенной на рис 2.25, приняты следующие обозначения: $R_{ш}$ – шунт реохорда, служащий для подгонки его сопротивления до заданного нормированного значения; $R_{п}$ – резистор для установки диапазона измеряемых температур; $R_{н}$ – резистор для установления начального значения шкалы; $R_{б}$ –

балластный резистор для установки различных градуировок, применяемых термопар; R_K - контрольный резистор для подгонки рабочего тока мостовой схемы при градуировке.

В настоящее время в промышленности применяются автоматические потенциометры типа ЭПД-0,7 и современные показывающие - типа КПП-1, КВП-1 и регистрирующие - типа КСП-1, КСП-2, КСП-3, КСП-4. На рис.2.26 показаны промышленные автоматические потенциометры.

Из выпускаемых промышленностью автоматических потенциометров в настоящее время нашли широкое применение следующие приборы:

- миниатюрные (КПП-1, КВП-1, КСП-1) с классом точности 1,0 и шириной диаграммной бумаги 100 мм;
- малогабаритные (КСП-2, КСП-3) с классом 0,5 и шириной диаграммной бумаги 160 мм для КСП-2 (потенциометр КСП-3 снабжен круговой диаграммой, как ЭПД-0,7);
- нормальногабаритные (КСП-4) с классом точности 0,25 и шириной диаграммной бумаги 250 мм.

Нормальногабаритные приборы выпускаются как одноточечными, так и многоточечными с тремя, шестью и двенадцатью точками контроля. Все они имеют унифицированные выходные сигналы постоянного тока с уровнями 0 -5 мА, 0 – 20, 4 -20 мА и 0 – 10 В.

На базе указанных автоматических потенциометров выпускаются также миллиамперметры и милливольтметры без изменения измерительной схемы. Это приборы типа КПУ-1, КВУ-1 (показывающие) и КСУ-1, КСУ-2, КСУ-3, КСУ-4 (самопишущие), которые также имеют унифицированные выходные сигналы.

В приборах данного типа для измерения силы тока 0 -5 и 0 -20 мА, на входе измерительной схемы устанавливается резистор с сопротивлением 2 и 5 Ом, соответственно. Ток от измерительного устройства, проходя по такому резистору, создает падение напряжения 0-10 В, уравниваемое компенсирующим напряжением измерительной схемы.

Для измерения напряжения в диапазоне 0 – 10 В, на входе потенциометра устанавливается делитель, состоящий из последовательно включенных двух резисторов (например, для измерения напряжения 0–100 мВ резисторы делителя имеют сопротивление 50 и 5000 Ом).

В автоматических потенциометрах со шкалой в милливольтках, миллиамперах все резисторы измерительной схемы выполнены из манганиновой проволоки.

2.6. Электрические термометры сопротивления

2.6.1. Основные сведения

Приборы или устройства, служащие для измерения температур и состоящие из электроизмерительного прибора с подключенным к нему термометром сопротивления, называются электрическими термометрами сопротивления. Электрические термометры широко применяются в промышленности для измерения температур в пределах от - 260 до 750 °С.

Принцип действия термометров сопротивления основан на свойстве веществ менять свое электрическое сопротивление при изменении температуры. Как показывает практика, большинство чистых металлов при нагреве на 1 °С увеличивает свое сопротивление в среднем на 0,4-0,6 %, а окислы металлов (полупроводники) и водные растворы солей и кислот при нагревании, наоборот, уменьшают свое сопротивление. Причем изменение сопротивления полупроводников от температуры происходит в 5-10 раз больше, чем у чистых металлов. За счет этого свойства полупроводниковых материалов наряду с термометрами сопротивления из чистых металлов широко применяются полупроводниковые терморезисторы.

Термометры сопротивления из чистых металлов изготавливаются обычно в виде обмотки из тонкой проволоки на специальном каркасе. Эту обмотку, являющуюся теплочувствительным элементом термометра, в целях предохранения от внешних воздействий заключают в защитную арматуру, аналогичную арматуре термопар (см. рис. 2.17).

При измерении температуры термометр сопротивления полностью погружают в среду, температура которой определяется. При этом, если известна зависимость сопротивления от температуры, то по его изменению судят о температуре измеряемой среды.

Для измерения сопротивления термометров в лабораторных условиях обычно применяют уравновешенные и неуравновешенные мосты, а при точных измерениях - потенциометры. В промышленных условиях термометр сопротивления работает в комплекте с автоматическими уравновешенными мостами и логометрами.

Так как обмотка термометра сопротивления занимает сравнительно много места, то с его помощью нельзя измерить температуру в отдельной точке, как, например, у термопар, что в определенной мере ограничивает возможность их применения. Однако, термометры сопротивления являются незаменимым средством, когда требуется измерить среднюю температуру какой-либо среды или участка поверхности.

К числу достоинств электрических термометров сопротивления следует также отнести:

- высокую степень точности измерения температуры;
- возможность градуировки шкалы прибора на любой допустимый измеряемый температурный интервал;
- возможность централизации контроля температуры путем подсоединения нескольких термометров сопротивления к одному измерительному прибору;
- возможность автоматической записи и дистанционной передачи сигнала измеряемой температуры.

2.6.2. Материалы, используемые в термометрах сопротивления

Материал, предназначенный для изготовления чувствительного элемента термометров сопротивления, должен отвечать ряду требований. Он должен быть химически инертным и не изменять своих физических свойств, не окисляться и не поддаваться иным вредным воздействиям при нагревании. Температурный коэффициент электросопротивления (ТКС) должен быть по

возможности большим. Зависимость изменения сопротивления материала от изменения температуры должна быть близка к линейной.

Химическая инертность материала, предназначенного для изготовления термометров сопротивления, должна быть значительно выше, чем у термопар, т.к. незначительное уменьшение сечения проволоки от химического воздействия среды будет вносить непоправимую погрешность в измерения из-за изменения электрического сопротивления термочувствительного элемента.

Приведенным выше основным требованиям, предъявляемым к материалам для термометров сопротивления, из числа чистых металлов удовлетворяют только платина, медь, никель и железо.

Платина обладает всеми основными свойствами, предъявляемыми к материалам для термометров сопротивления. В связи с этим она является незаменимым материалом не только для образцовых и технических термометров, но также и для эталонных, предназначаемых, как известно, для интерполяции международной температурной шкалы в интервале от -190 до 660°C .

Теплочувствительный элемент технических термометров сопротивления обычно изготавливается из тонкой платиновой проволоки (диаметром от $0,05$ до $0,07$ мм) или ленты (сечением от $0,002$ до $0,005$ мм). Вследствие малой прочности теплочувствительного элемента, изготовленного из такой проволоки, предел измерения температуры для технических термометров сопротивления ограничен и лежит в интервале от -120 до 500°C . В отдельных случаях платиновые термометры сопротивления применяют в технике для измерения температуры в области от -200 до 700°C . При этом их необходимо изготавливать из проволоки более толстого диаметра от $0,1$ мм.

На рис. 2.27 приведены зависимости изменения сопротивления применяемых металлов в термометрах сопротивления от температуры.

Как видно из рисунка, зависимость сопротивления чистой платины от температуры остается практически линейной в интервале температур от -40 до 650°C и определяется следующим уравнением:

$$R_t = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2), \quad (2.26)$$

где R_t - сопротивление термометра при рабочей температуре;

R_0 - сопротивление термометра при 0 °С;

А и В – постоянные определяемые при градуировке термометра.

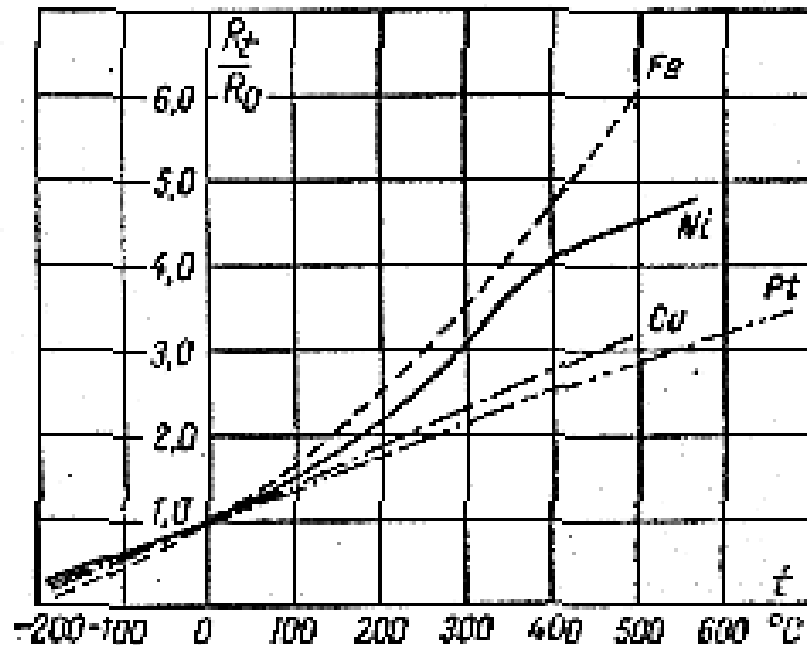


Рис. 2.27 - Изменение сопротивления металлов от температуры

В интервале же измеряемых температур от – 190 до 0 °С зависимость сопротивления платины определяется уравнением:

$$R_t = R_0 [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3], \quad (2.27)$$

где С – постоянная, определяемая также при градуировке термометра.

Коэффициенты А, В и С, входящие в уравнения (2.26) и (2.27), определяются обычно в точке кипения воды.

Температурный коэффициент сопротивления платины зависит от ее чистоты. Для изготовления образцовых термометров сопротивления применяется платина максимальной чистоты. Чистоту платины обычно характеризуют отношением сопротивления термометра при температуре кипения и замерзания воды R_{100}/R_0 (для чистой платины $R_{100}/R_0 = 1,391$). Для технических платиновых термометров сопротивления $R_{100}/R_0 = 1,387 \div 1,390$.

Медь. К достоинствам меди относятся ее дешевизна, доступность в виде тонких проводников в любой изоляции, возможность получения проводниковой меди высокой чистоты и сравнительно высокий температурный коэффициент сопротивления ($4,25 \cdot 10^{-3}$ - $4,28 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹). Кроме того, к достоинствам меди следует также отнести линейный характер зависимости ее сопротивления от температуры (см. рис. 2.27) в диапазоне температур от -50 до 200 °С. Эта зависимость выражается следующей формулой:

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t), \quad (2.28)$$

где R_t и R_0 - сопротивление термометра при рабочей температуре и 0 °С;

α - температурный коэффициент сопротивления (ТКС).

Температурный коэффициент металлов определяется для интервала температур 0 - 100 °С в соответствии с выражением

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{R_{100} - R_0}{100}. \quad (2.29)$$

К числу недостатков меди следует отнести малое удельное сопротивление ($\rho = 0,017$ ом·мм²·м⁻¹), что требует значительного количества медного провода при изготовлении термометра сопротивления, а также низкую химическую стойкость при высоких температурах, агрессивных и влажных средах.

Никель и железо. Основными достоинствами никеля и железа является то, что они обладают высоким температурным коэффициентом ($\alpha_{Ni} = 6,25 \cdot 10^{-3}$, $\alpha_{Fe} = 6,4 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹) и сравнительно большим удельным сопротивлением ($\rho_{Ni} = 0,95$, $\rho_{Fe} = 0,09$ ом·мм²·м⁻¹). К числу существенных недостатков железа следует отнести трудность получения одинаковой его чистоты и, кроме того, оно неустойчиво к окислению. Изменение сопротивления железа и, особенно никеля, подчиняется нелинейной зависимости (см. рис. 2.27), что вызывает существенные неудобства при их применении.

Вследствие указанных выше причин никель применяют до 200-250 °С, а железо - до 100-150 °С в условиях, когда термометр сопротивления не подвергается действию влаги.

Кроме рассмотренных выше чистых металлов, применяемых для изготовления термометров сопротивления, в отдельных случаях применяют свинец и фосфористую бронзу, содержащую незначительное количество свинца. Термометры сопротивления, изготовленные из свинца, находят применение главным образом в области низких температур, а термометры из фосфористой бронзы - в области сверхнизких температур. При сверхнизких температурах содержащийся в фосфористой бронзе свинец переходит в сверхпроводящее состояние, вследствие чего и возможно применение такого термометра сопротивления.

Полупроводники. В последние годы, как было сказано выше, появились возможности использования окислов металла, являющихся полупроводниками, в качестве материала для изготовления термометров сопротивления, которые называются термисторами.

Главным достоинством полупроводников по сравнению с металлами является то, что они обладают большим ТКС, достигающим 2-8 % выше на 1°C . Вследствие малой проводимости полупроводника представляется возможным изготавливать полупроводниковые термометры сопротивления с большим сопротивлением, что также является существенным достоинством.

Полупроводниковые термометры сопротивления для промышленного применения изготавливают главным образом из германия и смесей различных полупроводниковых веществ в форме цилиндров, шайб и бус, покрытых защитной эмалью. Основные характеристики чувствительных элементов полупроводниковых термометров приведены в таблице 2.13.

Терморезисторы являются малоинерционными термометрами, что позволяет их применять для нестационарных тепловых процессов. Большое собственное сопротивление этих термометров позволяет при измерении температуры не учитывать сопротивление соединительных проводов со вторичным прибором. Кроме того, полупроводниковые термометры возможно использовать в качестве бесконтактных температурных сигнализаторов.

К недостаткам полупроводниковых термометров можно отнести следующее:

- отсутствие возможности взаимозаменяемости чувствительных элементов термометров вследствие большого разброса номинального значения сопротивления;
- нелинейная зависимость сопротивления от температуры;
- малая допускаемая тепловая мощность рассеивания при прохождении электрического тока.

Таблица 2.13 - Характеристики полупроводниковых термометров сопротивления

Тип терморезистора	Номинальное сопротивление при 20 °С, кОм	Постоянная В·10 ² , К	Рабочие температуры, °С	Коэффициент рассеяния, мВт/К	Пост. времени, с
ММТ-1	1-220	20,6-43	-60 ÷ +125	5	85
ММТ-4	1-220	20,6-43	-60 ÷ +125	6	115
КМТ-1	22-1000	36-72	-60 ÷ +180	5	85
КМТ-11	100-3300	36-72	0 ÷ +125	0,8	10
КМТ-14	0,51-7500	41-70	-10 ÷ +300	0,8	60
КМТ-10	100-3300	36-72	0 ÷ +125	-	-

Для выпускаемых терморезисторов при измерении температур в диапазоне от – 100 до 300 °С зависимость их сопротивления от температуры определяется по следующей формуле:

$$R_t = A \cdot T^b \cdot e^{B/T}, \quad (2.30)$$

где Т- абсолютная температура, К;

А, В и b – постоянные коэффициенты, определяемые свойствами материала;

е – основание натурального логарифма.

При использовании терморезисторов в температурных интервалах не более 25 °С, формула (2.3.) упрощается и имеет вид:

$$R_t = A \cdot e^{B/T}. \quad (2.31)$$

2.6.3. Устройство металлических термометров сопротивления

Как было отмечено выше, металлические термометры сопротивления изготавливаются из тонкой проволоки, наматываемой на диэлектрический специальный каркас. Материал каркаса термометра, предназначенного для измерения температур выше $100-150^{\circ}\text{C}$, должен отвечать ряду требований. Он должен обладать хорошими изоляционными качествами и механической прочностью. Материал каркаса должен быть жароустойчивым и не должен оказывать вредного влияния на металлическую проволоку, намотанную на него. Этим требованиям в настоящее время удовлетворяют слюда, плавленый кварц и фарфор.

Применение слюды ограничено из-за того, что при температурах выше 500°C из нее выделяется кристаллизационная вода, вследствие чего слюда разбухает, расщепляется и теряет изоляционные свойства.

Термометры сопротивления, использующие кварцевые и фарфоровые каркасы, могут применяться при более высоких температурах. При этом предпочтение отдается кварцевым каркасам, т.к. они обладают лучшими изоляционными качествами.

Для изготовления каркаса термометра, предназначенного для измерения температур ниже 100°C могут использоваться различные пластмассы, т.к. в этом случае требования жароустойчивости отпадают (такие каркасы используются в основном у медных термометров сопротивления).

Проводниковые выводы, соединяющие теплочувствительный элемент с зажимами, находящимися в головке термометра, не должны оказывать вредного влияния на материал проволоки теплочувствительного элемента. Кроме того, материал проводника термометра должен быть химически стойким и в паре с медными проводами не развивать значительной термо-э.д.с. В технических термометрах, применяемых для измерения температур, не превышающих 150°C , применяют медные выводы. При более высоких температурах в технических платиновых термометрах используются выводы из серебряной проволоки, а в платиновых термометрах, предназначенных для точных измерений, выводы изготавливают из платины или золота.

Материал защитной арматуры, в которую помещается теплочувствительный элемент термометра, не должен химически влиять на проволоку теплочувствительного элемента, должен быть жароустойчив и обладать достаточно высокой прочностью. Кроме того, арматура термометра должна быть влагонепроницаемой.

Различные виды каркасов для металлических термометров сопротивления представлены на рис. 2.28.

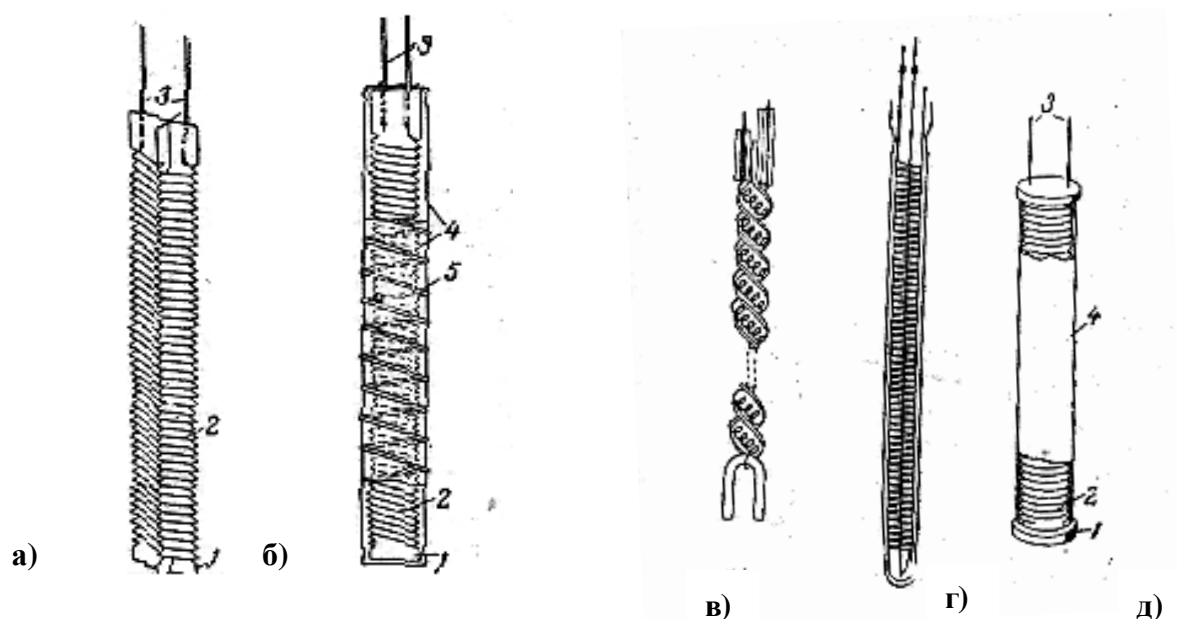


Рис. 2.28 - Разновидности каркасов термометров сопротивления

а- слюдяной крест: 1-крестообразный каркас; 2- медная или платиновая проволока; 3- выводы из серебряной или платиновой проволоки. *б- слюдяная пластина* (пластинчатый каркас с зубчатой нарезкой): 2,3- рабочая проволока и выводы, соответственно; 4- слюдяные изолирующие пластинки; 5- серебряная укрепляющая пластины лента. *в- кварцевый винтовой каркас.* *г- кварцевый пластинчатый каркас.* *д- фарфоровый цилиндрический каркас:* 1- фарфоровый цилиндр; 2- рабочая проволока; 3- выводы из серебряной проволоки; 4- шамотовая обмазка

Применяемые в промышленности платиновые термометры сопротивления (ТСП) и медные (ТСМ) в зависимости от температурного диапазона измерения имеют нормируемое номинальное значение сопротивления при 0°C (R_0), определяемое соответствующей градуировкой. Термометры платиновой группы имеют три градуировки Гр.20, Гр.21 и Гр.22, а термометры медной группы - две Гр.23 и Гр.24. Значения сопротивления R_0 для различных градуировок приведено в табл. 2.14.

Таблица 2.14 - Градуировки металлических термометров сопротивления

Тип термометра	ТСП	ТСП	ТСП	ТСМ	ТСМ
Градуировка	Гр.20	Гр.21	Гр.22	Гр.23	Гр.24
R_0 , Ом	10	46	100	53	100

При выборе термометра сопротивления той или иной градуировки для измерения температуры необходимо руководствоваться свойствами применяемого металла в термометре, указанными выше, а также требованием к чувствительности термометра для измеряемого диапазона. Так для измерения высоких температур можно выбирать градуировку с меньшим номинальным значением сопротивления R_0 , хотя при этом сопротивление соединительных проводов с измерительным прибором будет оказывать большее влияние на результаты измерения.

Всем промышленным термометрам сопротивления присваиваются классы точности, определяемые максимально допустимым отклонением сопротивления от градуировочных таблиц. Допустимые отклонения показаний ТСП и ТСМ приведены в таблице 2.15.

Значения сопротивления платиновых и медных термометров от температуры приведены в таблице 2.16.

При этом максимально допустимые отклонение сопротивления определяются в соответствии с формулой:

$$\Delta R = \pm \frac{\Delta t \cdot (R_{100} - R_0)}{100} . \quad (2.32)$$

Таблица 2.15 - Максимально-допустимые отклонения ТСП и ТСМ от градуировки

Тип термометра	Класс точности	Интервал температур, °C	Максимальное отклонение Δt , °C
ТСП	1	0 ÷ 650	$\pm (3,0 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,15)$
		0 ÷ -200	$\pm (4,5 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,15)$
ТСП	2	0 ÷ 650	$\pm (4,5 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,3)$
		0 ÷ -200	$\pm (6,0 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,3)$
ТСМ	2	-50 ÷ 180	$\pm (3,5 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,3)$
ТСМ	3	-50 ÷ 180	$\pm (6,0 \cdot 10^{-3} \cdot t + 0,3)$

Таблица 2.16

Группировка ⁶	°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
		R ₀ , Ом									
Гр.21	-200	7,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Гр.22		17,28	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Гр.21	-100	27,44	25,54	23,63	21,72	19,79	17,85	15,9	13,93	11,95	9,96
Гр.22		59,65	55,52	51,38	47,21	43,02	38,8	34,56	30,29	25,98	21,65
Гр.21	0	46,0	47,82	49,64	51,45	53,26	55,06	56,86	58,65	60,43	62,21
Гр.22		100,0	103,9	107,9	111,9	115,8	119,7	123,6	127,5	131,4	135,2
Гр.21	100	63,99	65,76	67,52	69,28	71,03	72,76	74,52	76,26	77,99	79,81
Гр.22		139,1	142,9	146,8	150,6	154,4	158,2	162,0	165,8	169,5	173,4
Гр.21	200	81,43	83,15	84,86	86,56	88,26	89,96	91,64	93,33	95,0	96,68
Гр.22		177,0	180,7	184,5	188,2	191,9	195,6	199,2	202,9	206,5	210,2
Гр.21	300	98,34	100,0	101,7	103,3	104,9	106,6	108,3	109,9	111,5	113,1
Гр.22		213,8	217,4	221,0	224,6	228,2	231,7	235,39	238,8	242,4	245,9
Гр.21	400	114,7	116,3	117,9	119,5	121,1	122,7	124,3	125,9	127,4	128,9
Гр.22		249,4	252,9	256,4	259,8	263,3	266,7	270,2	273,6	277,0	280,4
Гр.21	500	130,5	132,1	133,75	135,2	136,7	138,3	139,8	141,3	142,8	144,3
Гр.22		283,8	287,2	290,6	293,9	297,3	300,6	303,9	307,2	310,5	313,8
Гр.21	600	145,8	147,4	148,8	150,3	151,8	153,3	154,8	156,2	157,7	159,2
Гр.22		317,1	320,3	323,6	326,8	330,0	333,3	336,5	339,6	342,8	346,0
Гр.21	700	160,6	162,0	163,5	164,9	166,4	-	-	-	-	-
Гр.22		349,1	352,3	355,4	358,5	361,7	-	-	-	-	-
Гр.23	-50	41,71	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Гр.24		78,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Гр.23	0	53,0	55,26	57,52	59,77	62,03	64,29	66,55	68,81	71,06	73,32
Гр.24		100,0	104,3	108,5	112,8	117,0	121,3	125,6	129,8	134,1	138,3
Гр.23	100	75,58	77,84	80,09	82,35	84,61	86,87	89,13	91,38	-	-
Гр.24		142,6	146,9	151,1	155,4	159,6	163,9	168,2	172,4	-	-
Гр.23	180	93,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Гр.24		176,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-

⁶ Для термометров Гр.20 (R₀=10 Ом) используются значения R₀ для Гр.22, деленные на 10.

Пример 2.6. Пользуясь данными таблицы 2.14 и 2.15, определить сопротивление медного термометра градуировки Гр.24 2-го класса точности при температуре 155 °С, а также максимальное и минимальное допустимое сопротивление его при этой температуре.

Для определения сопротивления воспользуемся формулой (2.28), в соответствии с которой $R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot 155)$. Температурный коэффициент сопротивления меди α определим по формуле (2.29):

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{R_{100} - R_0}{100} = \frac{1}{100} \frac{142,6 - 100,0}{100} = 0,00426 \quad (C^{-1})$$

Поскольку сопротивление термометра при температуре 0 °С составляет 100 Ом, то отсюда получим: $R_t = 100 \cdot (1 + 0,00426 \cdot 155) = 166,03$ (Ом).

Принимая во внимание, что зависимость сопротивления медного термометра от температуры линейна, то, интерполировав табличные значения его сопротивлений для точек 160 и 150 °С, определяем $R_{155} = 166,03$ (Ом), что совпадает с расчетным значением сопротивления R_t термометра. Максимальное отклонение сопротивления термометра при расчетной температуре в соответствии с (2.32) не должно превышать:

$$\Delta R = \pm \frac{(3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 155 + 0,3) \cdot (142,6 - 100)}{100} = 0,359 \text{ (Ом)} .$$

Отсюда $R_{155} \text{ max} = 166,03 + 0,359 = 166,389$ (Ом), а $R_{155} \text{ min} = 166,03 - 0,359 = 165,671$ (Ом).

2.7. Приборы, применяемые с термометрами сопротивления

2.7.1. Компенсационный метод измерения сопротивления

Компенсационный метод измерения сопротивления обычно применяется для проведения точных измерений лабораторными термометрами сопротивления, а также при градуировке этих термометров. При этом термометры сопротивления должны быть снабжены четырьмя выводными проводниками: двумя токовыми и двумя потенциальными.

Данный метод обеспечивает высокую точность и не требует введения поправки на сопротивление подводящих проводников. Измерение сопротивлений по данному методу производится при помощи потенциометров, поэтому этот метод часто называют потенциометрическим. Схема измерения сопротивления термометра потенциометрическим методом приведена на рис. 2.29.

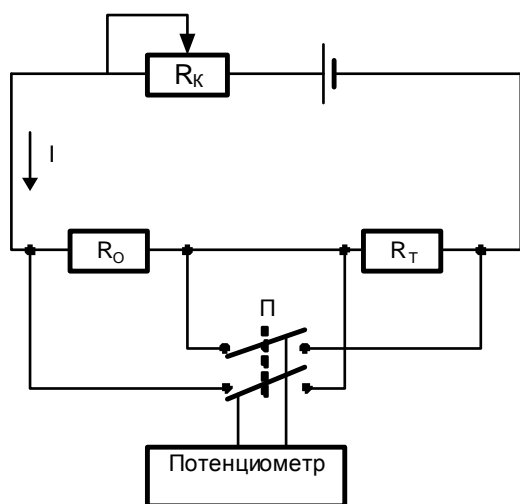


Рис.2.29 - Метод измерения сопротивления термометра потенциометром



Рис.2.30 - Магазин сопротивления

В этой схеме термометр сопротивления R_T последовательно включен с образцовым сопротивлением R_O в цепь источника постоянного тока I , сила которого регулируется резистором R_K и устанавливается по разности потенциалов на сопротивлении R_O . В качестве образцового сопротивления используются образцовые катушки сопротивления класса точности 0,01 или 0,02, а также магазин сопротивления соответствующего класса, общий вид которого приведен на рис. 2.30.

Измерения по приведенной схеме производятся путем последовательного подключения сопротивлений R_O и R_T к потенциометру с помощью переключателя Π . При этом для расчетов пользуются следующими соотношениями:

$$U_O = I \cdot R_O; \quad U_T = I \cdot R_T, \quad (2.33)$$

откуда

$$R_T = \frac{U_T}{U_O} \cdot R_O, \quad (2.34)$$

где I – сила тока в измерительной цепи;

U_O , U_T – падение напряжения

на соответствующих сопротивлениях.

Здесь следует иметь в виду, что ток, проходящий через термометр сопротивления, вызывает дополнительный его нагрев, поэтому он должен быть по возможности минимальным (до 5 мА), а падение напряжения на резисторах не превышает нескольких десятков миллиампер. В связи с этим в качестве измерительных приборов здесь применяются лабораторные низкоомные потенциометры класса 0,01 или 0,02.

2.7.2. Уравновешенные мосты

Уравновешенные четырехплечные мосты являются наиболее простыми и распространенными приборами для измерения сопротивления термометра как при градуировке, так и при измерениях температуры в лабораторных условиях. При измерении сопротивления термометра с помощью уравновешенных мостов используется нулевой метод или метод отклонения. Необходимо отметить также, что мосты применяются не только для работы с термометрами сопротивления, но и датчиками других физических величин, выходным сигналом которых является изменение сопротивления от измеряемой величины.

Принципиальная схема уравновешенного моста с термометром сопротивления R_T , включенным в одно из его плеч, приведена на рис. 2.31, для которого сопротивление остальных трех плеч R_1 , R_2 и R_3 известны.

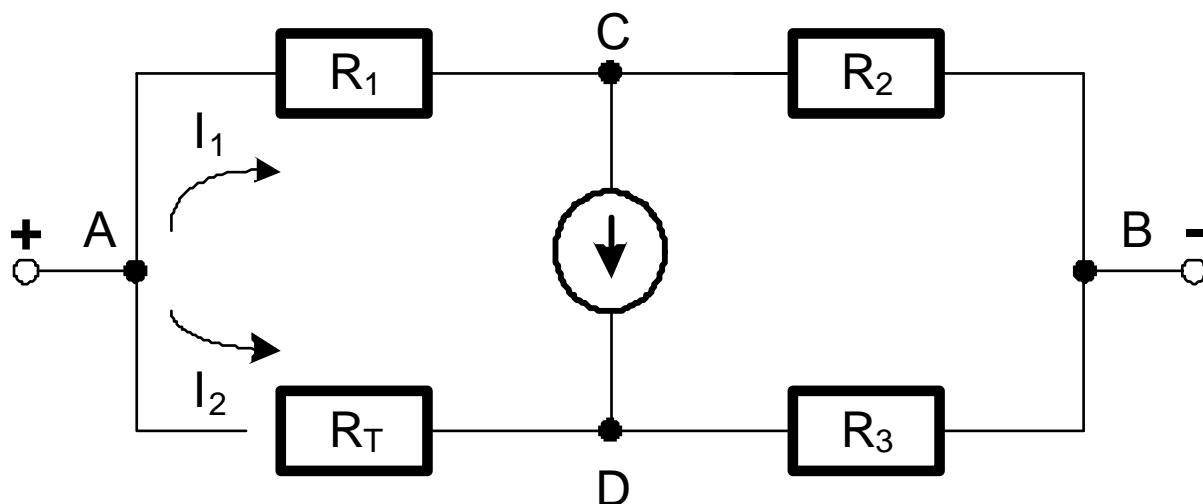


Рис.2.31 - Принципиальная схема четырехплечного измерительного моста

Определим условие равновесия для данного моста.

Равновесием моста считается отсутствие тока в измерительной его диагонали CD ($I_{CD} = 0$), что достигается в случае разности потенциалов $U_{CD} = 0$.

При подаче напряжения постоянного тока в диагональ питания АВ, по ветвям моста АСВ и АDB потекут токи I_1 и I_2 , которые определяются в соответствии со следующими выражениями:

$$I_1 = \frac{U_{AB}}{R_1 + R_2} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{U_{AB}}{R_T + R_3},$$

а потенциалы в точках С и D определяются падением напряжения на сопротивлениях R_1 и R_T по формулам:

$$U_C = I_1 \cdot R_1 = \frac{U_{AB}}{R_1 + R_2} \cdot R_1 \quad \text{и} \quad U_D = I_2 \cdot R_T = \frac{U_{AB}}{R_T + R_3} \cdot R_T.$$

Отсюда из условия равновесия моста получаем следующее соотношение:

$$U_{CD} = U_C - U_D = \frac{U_{AB}}{R_1 + R_2} \cdot R_1 - \frac{U_{AB}}{R_T + R_3} \cdot R_T = 0$$

или

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{R_T}{R_T + R_3}.$$

После проведения соответствующих преобразований, окончательно получим:

$$R_1 \cdot R_3 = R_T \cdot R_2. \quad (2.35)$$

Таким образом, для равновесия моста необходимо и достаточно, чтобы произведения его противолежащих плеч были равны.

Как видно из соотношения (2.35), равновесие моста не зависит от величины питающего напряжения U_{AB} , что является преимуществом данного моста.

Для измерения сопротивления R_T уравновешенным мостом пользуются выражением, вытекающим из соотношения (2.35)

$$R_T = \frac{R_3}{R_2} \cdot R_1,$$

из которого видно, что уравновесить мост можно изменением сопротивления R_1 при постоянном отношении балластных плеч R_3/R_2 , т.е. каждому значению сопротивления термометра соответствует определенное значение сопротивления сравнительного плеча R_1 при выбранном отношении R_3/R_2 .

Общий вид уравновешенного моста для измерения сопротивления в лабораторных условиях представлен на рис. 2.32.

Измерение сопротивлений при помощи данного моста осуществляется следующим образом. Сопротивление R_T подключается к измерительным клеммам. Затем, вращая ручки четырех декадных потенциометров, добиваются нулевого показания гальванометра, что соответствует равновесию моста. Отсчет показаний производится по шкалам потенциометров, определяющим значение R_1 при соответствующем положении переключателя коэффициента умножения $K = \frac{R_3}{R_2}$, имеющего десятикратное изменение шага в интервале от 0,001 до 1000 (максимальное значение R_1 при $K = 1$ составляет 9999 Ом).



Рис. 2.32 - Мост постоянного тока
типа МО-56

Пример 2.7. Определить напряжение разбаланса уравновешенного моста при измерении температуры термометром типа ТСМ Гр.23, если температура изменилась от 100 до 150 °С, а отношение его балластных плеч составляет $R_3:R_2 = 10:100$ и $U_{ПИТ} = 5$ В.

Термометр данного типа обладает $\text{ТКС} = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, следовательно, при исходной температуре, равной $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, его сопротивление в соответствии с выражением (2.28) составит $R_{100} = 53 \cdot (1 + 100 \cdot 4,26 \cdot 10^{-3}) = 75,58 \text{ (Ом)}$.

При исходном равновесии моста, по выражению (2.35), определяем сопротивление его сравнительного плеча в соответствии с рис.2.31:

$$R_1 = R_T \cdot (R_2 : R_3) = 75,58 \cdot (100 : 10) = 755,8 \text{ (Ом)}.$$

При температуре $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ сопротивление термометра будет равно $R_{150} = 53 \cdot (1 + 150 \cdot 4,26 \cdot 10^{-3}) = 86,87 \text{ (Ом)}$, а сопротивление остальных плеч останется неизменным, т.е. $R_1 = 755,8 \text{ (Ом)}$; $R_2 = 100 \text{ (Ом)}$; и $R_3 = 10 \text{ (Ом)}$. Токи I_1 и I_2 , протекающие в ветвях моста, соответственно будут равны:

$$I_1 = \frac{U_{\text{пит}}}{R_1 + R_2} = \frac{5}{755,8 + 100} = 0,0058 \text{ (А)}; \quad I_2 = \frac{U_{\text{пит}}}{R_T + R_2} = \frac{5}{86,87 + 10} = 0,052 \text{ (А)}$$

Падение напряжения на сопротивлениях R_1 и R_T , а следовательно и потенциалы в точках С и D соответственно составят:

$$U_C = R_1 \cdot I_1 = 755,8 \cdot 0,0058 = 4,38 \text{ (В)}; \quad U_D = 86,87 \cdot 0,052 = 4,52 \text{ (В)}.$$

Отсюда напряжение разбаланса моста составит:

$$U_{CD} = U_C - U_D = 4,38 - 4,52 = - 0,14 \text{ (В)}.$$

2.7.3. Неуравновешенные мосты

Для измерения температуры в эксплуатационных условиях с помощью термометров сопротивления применяют в качестве показывающих приборов неуравновешенные мосты. На рис. 2.33-а показана принципиальная двухпроводная схема неуравновешенного моста, где R_1 , R_2 и R_3 - постоянные сопротивления плеч моста; R_T - сопротивление термометра; R_M - сопротивление милливольтметра; R_P - регулировочное сопротивление; R_K - контрольное сопротивление; П - переключатель, позволяющий включать либо термометр сопротивления (положение *И*), либо контрольное сопротивление (положение *К*). Если при положении *И* переключателя П сопротивление термометра изменится, то через милливольтметр, включенный в диагональ моста, потечет ток и стрелка его отклонится. Угол отклонения стрелки прибора будет тем больше, чем значительнее нарушено равновесие моста. Таким образом, устанавливается известная зависимость между отклонениями стрелки

милливольтметра и сопротивлением термометра, позволяющая судить о температуре измеряемой среды. Для уменьшения погрешности измерения вследствие изменения температуры соединительных проводов, соединяющих термометр с измерительным прибором, применяют трехпроводную схему (см. рис. 2.33-б) либо высокоомные термометры сопротивления.

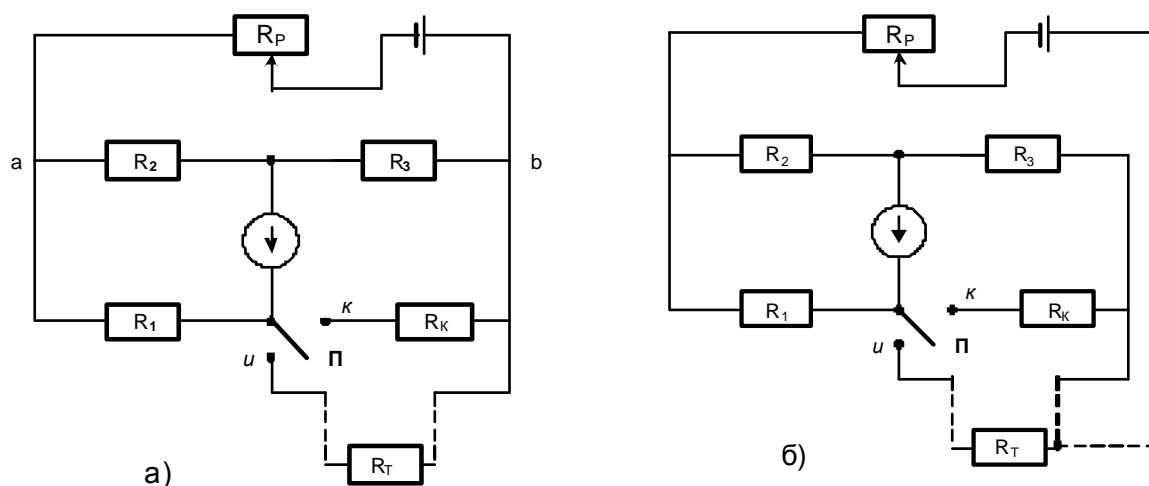


Рис. 2.33 - Принципиальная схема неуравновешенного моста
а)- двухпроводная; б) – трехпроводная схема подключения датчика

Сила тока, протекающего через милливольтметр, включенный в диагональ неуравновешенного моста, выражается следующим уравнением:

$$I = U_{ab} \cdot \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_T}{R_M (R_1 + R_T)(R_2 + R_3) + R_2 R_3 (R_1 + R_T) + R_1 R_T (R_2 + R_3)}, \quad (2.36)$$

где R_M – сопротивление моста в точках a b .

Из этого уравнения видно, что ток в милливольтметре пропорционален напряжению питания U_{ab} , подаваемого к вершинам моста. Вследствие этого для обеспечения постоянства градуировки прибора необходимо поддерживать постоянным напряжение питания моста, что обеспечивается подгонкой сопротивления R_P . Для контроля напряжения питания служит постоянное независимое от температуры контрольное сопротивление R_K , включаемое в схему вместо термометра сопротивления R_T с помощью переключателя П.

Величину сопротивления R_K выбирают такой, чтобы контрольное деление на шкале, отвечающее этому сопротивлению, совпадало с наиболее часто измеряемой температурой. Поэтому величину R_K обычно принимают равной сопротивлению термометра и соединительных проводов, при котором стрелка устанавливается на двух третях шкалы. Эта контрольная точка на шкале милливольтметра обозначается красной чертой. Если при включении сопротивления R_K стрелка милливольтметра не дошла до красной черты, то напряжение питания мало, а если перешла – велико и, следовательно, необходима регулировка напряжения питания.

2.7.4. Логометры

При измерениях температуры с помощью термометров сопротивления на практике широко используются приборы, называемые логометрами (от греческого слова *logos* – отношение). Логометры относятся к приборам магнитоэлектрической системы и могут быть использованы также в комплекте с любыми омическими и индукционными датчиками.

Измерительная система логометров состоит из двух рамок, помещенных в поле постоянного магнита. При этом механический противодействующий момент у них отсутствует. При измерении угол отклонения, а, следовательно, и уравновешивание подвижной системы логометра определяются отношением сил токов, проходящих через обе его рамки, и поэтому показания логометра не зависят от колебания напряжения источника питания.

Принципиальная схема логометра со скрещенными рамками приведена на рис. 2.34. Здесь в междуполюсном пространстве постоянного магнита на общей оси (двух кернах) укреплены две скрещенные и жестко связанные между собой рамки R_p и R'_p , изготовленные из тонкой изолированной медной проволоки. Эти рамки могут свободно поворачиваться в зазоре, образованном полюсными наконечниками и сердечником цилиндрической формы, закреплёнными так же, как и полюсные наконечники, неподвижно.

Рамки логометра включены таким образом, что их вращающие моменты направлены навстречу друг другу. Подвод тока к рамкам производится с помощью тонких безмоментных вводов, сделанных из золотых ленточек и практически не создающих механического (упругого) противодействующего момента. На приведенной схеме R_1 и R_2 - постоянные сопротивления, а R_T - сопротивление термометра.

Ток от источника питания в точке А разветвляется и далее проходит по двум ветвям: через рамку R_p , сопротивление R_1 , а также рамку R'_p и сопротивление R_2 . При

протекании токов I_1 и I_2 через рамки логометра создаются магнитные поля, которые, взаимодействуя с полем постоянного магнита, создают вращающие моменты M_1 и M_2 , направленные навстречу друг другу. При изготовлении логометров добиваются, чтобы сопротивления рамок были одинаковыми и $R_1 = R_2 + R_t$ в начальной точке шкалы. Тогда

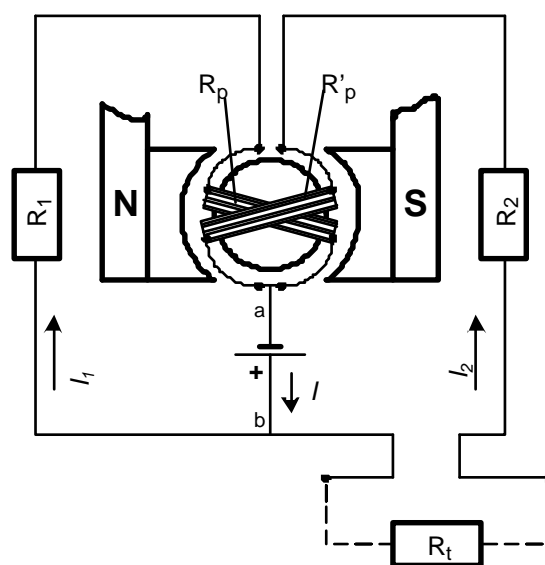


Рис. 2.34 - Принципиальная схема логометра

токи I_1 и I_2 , протекающие через рамки, и моменты M_1 и M_2 будут также равны. Это приведет к тому, что система рамок с закрепленной на ней указательной стрелкой займет определенное положение. Если сопротивление R_t вследствие нагрева термометра сопротивления возрастет, то момент M_1 станет больше, т.к. ток I_1 станет больше I_2 и подвижная система станет поворачиваться в направлении действия момента M_1 . При этом рамка R_p с большим моментом попадет в слабое магнитное поле и ее момент уменьшится, а момент рамки R'_p , наоборот, будет увеличиваться. При определенном угле поворота моменты

сравниваются и подвижная система остановится. Тогда можно записать следующее уравнение:

$$M_1 = M_2 \quad \text{или} \quad S_1 \cdot n_1 \cdot B_1 \cdot I_1 = S_2 \cdot n_2 \cdot B_2 \cdot I_2, \quad (2.37)$$

где S_1 и S_2 – площадь активной части рамок, м^2 ;

n_1 и n_2 – количество витков рамок R_p и R'_p , соответственно;

B_1 и B_2 – магнитная индукция в зонах расположения рамок, Т;

I_1 и I_2 – токи в соответствующих рамках, А.

Принимая в уравнении (2.37) $S_1 \cdot n_1 = S_2 \cdot n_2$, получим:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2}{B_1} = f(\omega) \quad \text{или} \quad \omega = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right), \quad (2.38)$$

где ω – угол поворота рамок; f и F – функциональные операторы.

Подставляя в уравнение (2.38) значения токов, проходящих через рамки,

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_p + R_1} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{U_{ab}}{R'_p + R_2 + R_T}, \quad \text{получим:}$$

$$\omega = F\left(\frac{R'_p + R_2 + R_T}{R_p + R_1}\right). \quad (2.39)$$

Поскольку значения всех сопротивлений постоянны, то угол поворота подвижной системы будет пропорционален измеряемому сопротивлению термометра, т.е. $\omega = F(R_T)$.

В логометрах при выключенном напряжении стрелка может оставаться в любом месте шкалы, поэтому в этих приборах показывающего типа предусматриваются специальные возвратители, либо маломоментные спиральные волоски.

Рамки логометра обычно изготавливают из медной проволоки, т.е. из материала с большим температурным коэффициентом, а сопротивления R_1 и R_2 – из манганина, обладающего практически нулевым температурным коэффициентом. Поэтому для уменьшения температурного коэффициента логометра, включенного по схеме, приведенной на рис. 2.34, необходимо, чтобы отношение сопротивления меди к суммарному сопротивлению меди и манганина было по возможности меньшим.

Для уменьшения погрешности от температурного изменения сопротивления соединительных проводов применяют высокоомные термометры сопротивления и трехпроводную схему включения термометра.

Широко применяемые в настоящее время мостовые схемы логометров можно подразделить на две разновидности - симметричные и несимметричные. Симметричные мостовые схемы, применяемые для логометров со скрещенными рамками, позволяют осуществить температурную компенсацию, не понижая чувствительности приборов, а несимметричные схемы пригодны только для включения логометров с отдельными магнитными полями или с рамками, расположенными Т-образно. Мостовая схема логометра позволяет при одной и той же форме сердечника с полюсными наконечниками и одних и тех же рамках получать практически шкалу с любыми пределами измерения, изменяя лишь сопротивление отдельных элементов мостовой схемы.

Применяемые в промышленности логометры могут быть использованы для регулирования и сигнализации отклонения температуры контролируемых объектов при комплектации их соответствующими дополнительными устройствами. Шкала логометров градуирована в градусах Цельсия, что предполагает их использование с термометрами сопротивления только определенной градуировки.

2.7.5. Автоматические уравновешенные мосты

Для измерения и записи температуры на диаграммной бумаге в эксплуатационных условиях широко применяются вместе с термометрами сопротивления электронные автоматические уравновешенные мосты. Схема автоматического моста практически ничем не отличается от схемы лабораторного уравновешенного моста, рассмотренного выше. В автоматических мостах уравновешивание происходит не вручную, а автоматически с помощью электродвигателя и специального балансирующего устройства. Автоматические уравновешенные мосты, так же как и автоматические потенциометры, могут быть снабжены дополнительными

устройствами для регулирования и сигнализации температуры, а иногда и преобразователями для дистанционной передачи показаний. Эти мосты находят также применение для измерения других физических величин, изменения которых могут быть преобразованы в изменение активного электрического сопротивления. Шкала автоматических уравновешенных мостов градуирована в градусах Цельсия и действительна для работы с термометрами сопротивления соответствующей градуировки и заданного значения сопротивления внешней соединительной линии.

Автоматические уравновешенные мосты являются техническими приборами высокого класса точности, которые соответствуют установленным классам 0,25; 0,5; 1,0 и 1,5 аналогично, как и для автоматических потенциометров. В настоящее время используются автоматические уравновешенные мосты типов КПМ, КВМ и КСМ1, КСМ2, КСМ3, КСМ4. Конструкция и типоразмеры мостов серии КСМ полностью соответствуют типоразмерам автоматических потенциометров серии КСП (см. выше). Автоматические уравновешенные мосты выпускаются как одноточечные, так и многоточечные (3, 6 и 12 точек контроля).

В автоматических мостах используется измерительная схема четырехплечного моста с реохордом. Эта схема при обеспечении высокой точности измерения позволяет выполнять шкалы автоматического моста односторонние, двусторонние и безнулевые.

Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста приведена на рис. 2.35. На этой схеме приняты следующие обозначения:

R_P – реохорд; $R_{ш}$ – шунт реохорда, служащий для подгонки сопротивления реохорда до нормированного значения; $R_{п}$ – резистор установки диапазона измерения; $R_{д}$ – добавочный резистор для установки начального значения шкалы; T_0 – токоотвод; $R_Б$ – балластный резистор для ограничения тока питания мостовой схемы; R_1 , R_2 , и R_3 – резисторы мостовой схемы; R_T – термометр сопротивления; $R_{л}$ – резисторы для подгонки сопротивления линии

связи; РД – реверсивный асинхронный двигатель; СД – синхронный двигатель для привода диаграммы.

Все резисторы мостовой схемы изготовлены из высокостабильной манганиновой проволоки. Реохорд и токоотвод автоматических мостов аналогичны по своему устройству таким же узлам автоматических потенциометров.

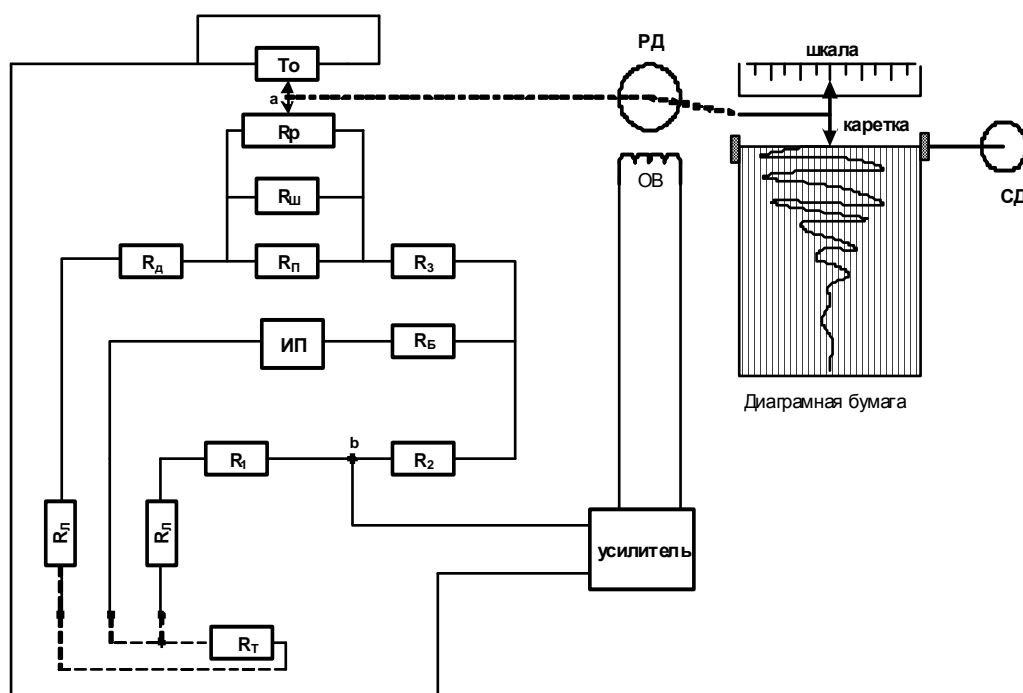


Рис. 2.35 - Принципиальная схема автоматического уравновешенного моста

Термометр сопротивления подключается к автоматическому мосту по трехпроводной схеме, что значительно снижает дополнительную погрешность, вызванную изменением сопротивления соединительных проводов при изменении температуры окружающего воздуха. Номинальное суммарное значение сопротивления соединительных проводов нормировано и установлено для каждого провода равным 5 Ом.

Мост работает следующим образом. При изменении температуры измеряемой среды изменяется сопротивление термометра R_T , нарушается

баланс моста и напряжение разбаланса подается от точек а и б измерительной схемы на усилитель. Выходной сигнал усилителя поступает на обмотку возбуждения ОВ реверсивного двигателя и приводит его во вращение. Вал реверсивного двигателя кинематически связанный с движком реохорда и кареткой перемещает их до тех пор, пока напряжение небаланса, уменьшаясь, не станет равным нулю. При этом мост приходит в новое состояние равновесия, реверсивный двигатель останавливается, а движок реохорда и каретка с указателем и пером занимают положение, соответствующее сопротивлению термометра в данный момент времени.

2.8. Методика контактного измерения температуры

В соответствии с поставленными задачами и требуемой точностью при измерении температуры среды должен быть сделан соответствующий выбор термометра расширения, электрического термометра, термоэлектрического термометра и др. Допустимые погрешности при измерении температуры определяют те требования, которые должны быть предъявлены к термометру по точности. При этом, в первую очередь, необходимо иметь в виду погрешность, которую термометр обеспечивает в конкретных рабочих условиях.

Одновременно с выбором термометра по его точности необходимо решать вопрос и о предельном значении его шкалы. Это связано с тем, что для стационарных термометров основная погрешность связана с предельным значением его шкалы. Вследствие этого для обеспечения наибольшей точности измерения желательно, чтобы измеряемая температура была близка к предельному допустимому значению для данного термометра.

Внешние условия работы вторичных приборов, входящих в комплект термометра, могут быть различны (окружающая температура, вибрации и т.д.).

Эти условия могут значительно влиять на результаты измерения, поэтому при выборе термометра их необходимо также учитывать.

Если вторичный прибор термометра работает при температуре окружающей среды ниже или выше нормальной, то исключить полностью влияние температуры на прибор практически невозможно. В таких случаях необходимо вводить соответствующие поправки. Необходимо также отметить, что температура среды для вторичных приборов не должна быть ниже -4°C или выше $+40^{\circ}\text{C}$ и, кроме того, среда не должна быть сильно запыленной, влажной и агрессивной. В противном случае следует применять специальные защитные устройства либо другие меры, обеспечивающие удовлетворительные условия работы прибора. Если вторичный прибор термометра приходится устанавливать в местах, где имеют место и неустранимы вибрации, применяют амортизаторы.

Точность измерения температуры зависит не только от точности применяемого термометра, но и от правильной установки его термоприемника (термометра сопротивления, термопары, термобаллона манометрического термометра).

Термометр, на каком бы принципе он ни был основан, показывает только свою собственную температуру. Эта равновесная температура, или так называемая собственная температура термоприемника, и рассматривается как температура измеряемой среды. Поэтому для обеспечения надлежащей точности измерения температуры необходимо прежде всего обеспечить правильную установку чувствительной части термометра.

Так, например, если стеклянный термометр, служащий для измерения температуры наружного воздуха, выставить на солнце, то ртуть в термометре нагреется за счет лучистой теплоты, и термометр будет показывать температуру более высокую, чем температура окружающего воздуха. В этом случае, для того, чтобы термометр показывал правильную температуру, необходимо защитить его от воздействия лучистой теплоты.

Термоприемник, установленный в измеряемую среду, представляет в ней постороннее тело, которое в той или иной мере подводит или отводит тепло и тем самым вызывает нарушение первоначального температурного поля в месте измерения. Это обстоятельство также может быть источником погрешностей. Например, при измерении температуры в каком-либо месте твердого тела после установки термопары температура в этом месте может изменяться вследствие отвода или подвода тепла от него по электродам термопары.

Идеальным способом установки термоприемника термометра является такой, при котором отсутствовали бы приток или утечка тепла от места измерения. Осуществить это условие практически невозможно. Однако путем ряда мероприятий всегда можно свести погрешности измерения к минимуму.

Следует отметить, что при измерении температуры среды необходимо также учитывать погрешности, обусловленные тепловой инерцией термоприемника, т.к. вследствие инерции температура его не всегда будет изменяться так же, как и температура среды.

При измерении температуры жидких и газообразных сред контактными методами необходимо учитывать погрешности, вызываемые влиянием теплообмена между измеряемой средой и датчиком, стенками сосуда, где находится измеряемая среда, теплопроводности арматуры самого датчика и т.д.

Рассмотрим процесс теплообмена при установке термоприемника в трубопроводе (см. рис. 2.36).

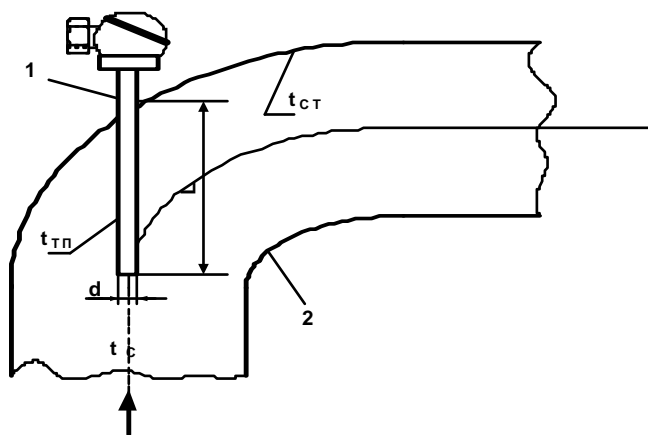


Рис. 2.36 -Термоприемник, установленный в трубопроводе

Если допустить, что утечка тепла через арматуру термоприемника 1 отсутствует, то при установившемся тепловом режиме количество тепла, получаемого от газа поверхностью погруженной части термоприемника посредством конвективного теплообмена, равно количеству тепла, отдаваемого поверхностью термоприемника путем лучистого теплообмена с поверхностью стенки трубы 2.

Количество тепла, полученное поверхностью термоприемника от среды, протекающей в трубопроводе, за счет конвективного теплообмена, определится в соответствии с формулой

$$Q_K = \alpha \cdot F_1 (t_C - t_{\text{ТП}}), \quad (2.40)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от среды к датчику, Вт/м²·К;

F_1 – поверхность погруженной части термоприемника, м² ($F_1 = \pi dl$);

t_C – температура измеряемой среды, °С;

$t_{\text{ТП}}$ – температура стенки термоприемника, °С.

Количество тепла, отдаваемое поверхностью термоприемника путем лучистого теплообмена с внутренней поверхностью трубопровода, определится по выражению:

$$Q_L = \varepsilon \cdot C_0 F_1 \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{ТП}}}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_{\text{СТ}}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.41)$$

где ε – приведенная степень черноты системы датчик-труба;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м²·К⁴;

$T_{\text{ТП}}$, $T_{\text{СТ}}$ – температуры стенки термоприемника и трубы, К.

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ТП}}} + \frac{F_1}{F_2} \cdot \left[\frac{1}{\varepsilon_{\text{СТ}}} - 1 \right]}, \quad (2.42)$$

где $\varepsilon_{\text{ТП}}$ – степень черноты поверхности термоприемника;

$\varepsilon_{\text{СТ}}$ – степень черноты внутренней поверхности трубопровода;

F_2 – поверхность стенки трубы, участвующая в теплообмене, м².

Поверхность погруженной части термоприемника обычно ничтожно мала по сравнению с поверхностью трубопровода, следовательно, можно принять

отношение F_1/F_2 , равным нулю. Тогда, как следует из уравнения (2,42), $\varepsilon_{\text{ТП}} \approx \varepsilon$. Приняв произведение $\varepsilon \cdot C_0 = C$ (коэффициент излучения поверхности теплоприемника) и $Q_K = Q_L$ из уравнений (2.40) и (2.41), получим выражение для определения ошибки измерения:

$$\Delta t = t_{\text{ТП}} - t_{\text{СТ}} = -\frac{C}{\alpha} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{ТП}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{СТ}}}{100} \right)^4 \right]. \quad (2.43)$$

Из данного уравнения следует, что уменьшение погрешности измерения возможно путем уменьшения коэффициента лучеиспускания C термоприемника, т.е. при применении защитных трубок с гладкой и блестящей поверхностью, либо экранирующих устройств, а также увеличения коэффициента теплоотдачи α , что возможно при увеличении скорости измеряемой среды. Погрешность измерения можно уменьшить также, выравнявая температуры трубы и теплообменника, для чего необходима хорошая тепловая изоляция трубопровода от внешней среды.

Пример 2.8. Определить возможную методическую погрешность измерения температуры отходящих дымовых газов $t_r = 400^\circ\text{C}$, обусловленную лучистым теплообменом, при скоростях потока 10 и 15 м/с в изолированном трубопроводе с внутренним диаметром $D = 0,3$ м. Температура измеряется датчиком, находящимся в защитном стальном чехле диаметром $d = 0,02$ м. Внутреннее тепловое сопротивление изоляции трубопровода $R_{\text{из}} = 2 \text{ м}^2 \cdot \text{K}/\text{Вт}$. Коэффициент излучения поверхности защитного чехла принять $C = 4,66 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$, а коэффициент теплоотдачи в окружающую среду $\alpha_n = 2 \text{ (Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{K})$ при ее температуре 20°C .

По справочным данным, коэффициент кинематической вязкости дымовых газов при данной температуре $\nu_r = 60,38 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; коэффициент теплопроводности $\lambda_r = 5,7210^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$; число Прандтля $Pr = 0,64$;

Определим значения числа Рейнольдса для заданных скоростей газа:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} : \quad Re_{10} = \frac{10 \cdot 0,02}{60,38 \cdot 10^{-6}} = 3312,4; \quad Re_{15} = \frac{15 \cdot 0,02}{60,38 \cdot 10^{-6}} = 4968,5.$$

Как видно, в обоих случаях имеет место слабо турбулентный режим течения газа, для которого определяется критерий Нуссельта по формуле, приведенной в литературных источниках:

$$Nu = 0,25 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38}.$$

Подставляя значения Re и Pr в приведенное уравнение, для различных скоростей газа, соответственно получим:

$$Nu_{10} = 0,25 \cdot 3312,4^{0,6} \cdot 0,64^{0,38} = 27,31 \text{ и } Nu_{15} = 0,25 \cdot 4968,5^{0,6} \cdot 0,64^{0,38} = 34,84.$$

Определим коэффициенты теплоотдачи α от газа к термоприемнику для заданных скоростей потока газа:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_r}{d} : \alpha_{10} = \frac{27,31 \cdot 5,72 \cdot 10^{-2}}{0,02} = 78,1 \text{ и } \alpha_{15} = \frac{34,84 \cdot 5,72 \cdot 10^{-2}}{0,02} = 99,6 \text{ (Вт/м}^2 \cdot \text{К)}$$

Коэффициенты теплоотдачи от газа к трубопроводу α' определяются по аналогичной формуле:

$$\alpha' = \frac{Nu \cdot \lambda_r}{D} : \alpha'_{10} = \frac{27,31 \cdot 5,72 \cdot 10^{-2}}{0,3} = 5,2 \text{ и } \alpha'_{15} = \frac{34,84 \cdot 5,72 \cdot 10^{-2}}{0,3} = 6,64.$$

Определим коэффициент теплопередачи от газа к трубопроводу по общеизвестной формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha'} + R_{из} + \frac{1}{\alpha_n}} : K_{10} = \frac{1}{\frac{1}{5,2} + 2 + \frac{1}{2}} = 0,37 \text{ и } K_{15} = \frac{1}{\frac{1}{6,64} + 2 + \frac{1}{2}} = 0,38, \text{ далее из}$$

соотношения $K \cdot \Delta t = \alpha \cdot \Delta t_1$, где Δt – температурный напор $t_r - t_n = 400 - 20 = 380$ °С, определим Δt_1 – перепад температуры при переходе тепла от газа к стенке трубы и температуру внутренней стенки трубы.

$$\text{При скорости 10 м/с } \Delta t_1 = \frac{0,37 \cdot 380}{5,2} = 27,04 \quad t_{сг} = t_r - \Delta t_1 = 400 - 27,04 = 372,96 \text{ (}^\circ\text{С)}.$$

$$\text{При скорости 15 м/с } \Delta t_1 = \frac{0,38 \cdot 380}{6,64} = 21,75 \quad t_{сг} = t_r - \Delta t_1 = 400 - 21,75 = 378,25 \text{ (}^\circ\text{С)}.$$

Воспользовавшись формулой (2.43) при различных скоростях потока, находим методические ошибки измерения температуры:

$$\Delta t_{10} = t_{тп} - t_{сг} = -\frac{4,66 \cdot 10^{-2}}{78,1} \cdot \left[\left(\frac{673}{100} \right)^4 - \left(\frac{645,96}{100} \right)^4 \right] = -0,19 \text{ (}^\circ\text{С)};$$

$$\Delta t_{15} = t_{тп} - t_{сг} = -\frac{4,66 \cdot 10^{-2}}{99,6} \cdot \left[\left(\frac{673}{100} \right)^4 - \left(\frac{651,25}{100} \right)^4 \right] = -0,12 \text{ (}^\circ\text{С)}.$$

Как видно из расчетов, ошибка измерения с ростом скорости потока уменьшается.

При измерении температуры среды следует также учитывать погрешности, обусловленные утечкой через арматуру термоприемника. В этом

случае температура конца защитной трубки термоприемника отличается от температуры стенки, в которой она закреплена. Вследствие этого тепло переходит от конца защитной трубки, а вместе с тем и от теплочувствительной части термоприемника, к более холодной стенке трубы. Благодаря оттоку тепла собственная температура термоприемника будет ниже, чем температура измеряемой среды.

Погрешности при измерении температуры среды, обусловленные утечкой тепла через защитную трубку термоприемника, могут быть достаточно просто определены при допущении, что термоприемник рассматривается как стержень конечной длины постоянного сечения. Для данного случая погрешность измерения может быть определена по следующей формуле:

$$t_{\text{пл}} - t_{\text{ср}} = - \frac{t_{\text{п}} - t_0}{\operatorname{ch} \ell \cdot \sqrt{\frac{\alpha \cdot \pi \cdot d}{\lambda \cdot f}}}, \quad (2.44)$$

где t_0 – температура основания защитной трубки, °С;

ℓ – глубина погружения защитной трубки, м;

d – наружный диаметр защитной трубки, м;

α – коэффициент теплоотдачи от среды к трубке, Вт/(м²·град);

λ – коэффициент теплопроводности материала трубки, Вт/(м·град);

f – площадь поперечного сечения трубки, м².

Как видно из этого уравнения, погрешность измерения может быть уменьшена приближением температуры t_0 к температуре измеряемой среды $t_{\text{ср}}$, а также увеличением длины трубки и коэффициента теплоотдачи. В данном случае следует также стремиться к выбору материала трубки с малым коэффициентом теплопроводности и небольшой площадью ее поперечного сечения.

На увеличение погрешности измерения часто оказывает выступающая наружу часть термоприемника. При этом погрешность измерения будет тем меньше, чем короче выступающая часть и коэффициент ее теплоотдачи к

наружному воздуху. Поэтому выступающая часть термоприемника должна быть по возможности короткой и иметь тепловую изоляцию.

На рис. 2.37 показаны различные способы установки термоприемников в трубопроводах

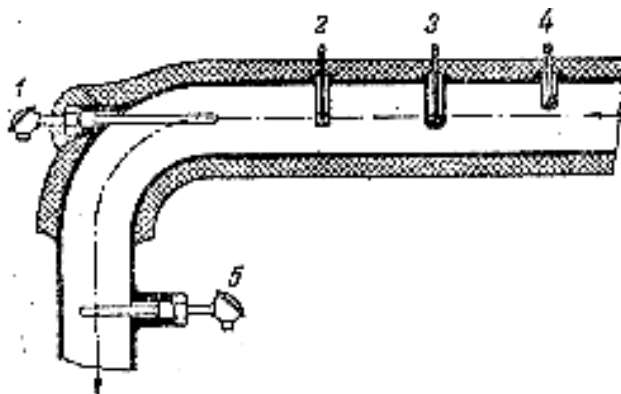


Рис. 2.37 - Способы установки термоприемников

Как показал опыт измерения температуры, наиболее правильными будут показания термометра 1, установленного вдоль оси трубопровода в изолированной его части. Несмотря на радиальную установку, погрешность измерения в случае 2 невелика вследствие наружной изоляции трубопровода. В случае 3 она возрастает из-за большой толщины стенки гильзы. У термометра 4 ошибка вследствие незначительной глубины погружения гильзы, а следовательно, и термометра, будет больше, чем в случае 3, а в случае 5 из-за отсутствия изоляции и радиальной установки, а также ввиду большой поверхности выступающей части ошибка будет самой большой.

Здесь необходимо отметить, что уравнения (2.43) и (2.44) позволяют оценить только порядок возможных погрешностей, т.к. ряд величин, входящих в эти уравнения, может быть оценен только лишь приближенно.

Как было отмечено выше, применение экранирующих устройств для термоприемников при измерениях температуры газов, жидкостей и пара позволяет снизить дополнительные погрешности измерения, обусловленные лучистым теплообменом. Однако экранирующими устройствами не всегда удобно пользоваться в эксплуатационных условиях, поэтому существует ряд

различных приемов установки датчиков температуры, позволяющих снизить теплотери при измерениях. Рассмотрим некоторые из них.

При измерении температуры окружающей среды в помещениях или на открытом воздухе экран для защиты от лучистого теплообмена обычно изготавливается в виде круглого отполированного или никелированного чехла с отверстиями (см.рис. 2.38).

На рис. 2.39 представлена схема установки экрана и термоприемника для измерения температуры газа в газоходе котла. Здесь термоприемник 1 устанавливается перпендикулярно к направлению потока и защищен экраном 2 от холодных трубок и барабана котла. Для обеспечения свободного прохода газа экран не имеет стенок со стороны входа и выхода газов.

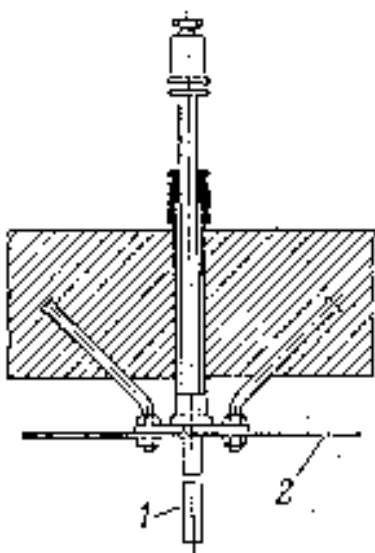


Рис.2.38 - Экранированный термометр для измерения температуры воздуха:

- 1 - защитная трубка;
- 2 - экран; 3 – головка термометра

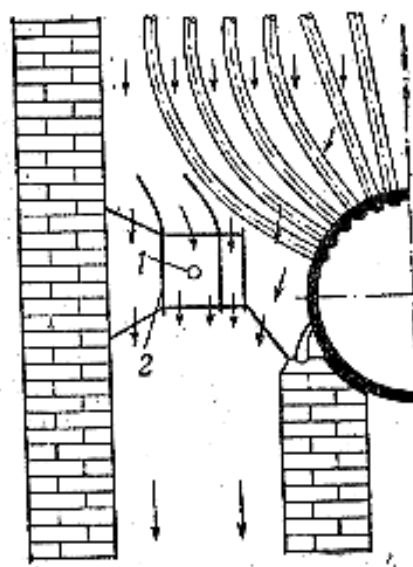


Рис.2.39 – Схема установки экрана и термометра для измерения температуры в газоходе котла

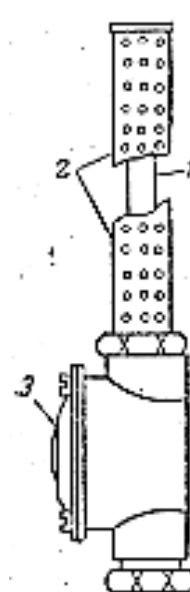


Рис.2.40 – Схема установки термометра с отражающей пластиной:

- 1 – термометр;
- 2 – стальная пластина

На рис. 2.40 показано устройство, способствующее уменьшению тепловой утечки по арматуре термоприемника. Это устройство представляет собой стальную пластинку 2, нагреваемую газом, которая подводит тепло к

защитному чехлу, за счет чего уменьшается отток тепла от погруженной части защитной трубки и помещенного в ней термоэлемента.

При измерении температуры газов или пара, протекающего в трубопроводах, следует считать образцовой установку термоприемника, показанную на рис. 2.41-а. Этот способ установки может быть рекомендован для всех типов термоприемников.

В тех случаях, когда по тем или иным причинам указанный способ установки термоприемника не может быть осуществлен, термоприемник рекомендуется устанавливать не радиально (рис.2.41-в), а наклонно к оси трубопровода (рис.2.41-б). При этом при установке термометра сопротивления необходимо, чтобы середина его тепло чувствительного элемента совпадала с осью трубопровода.

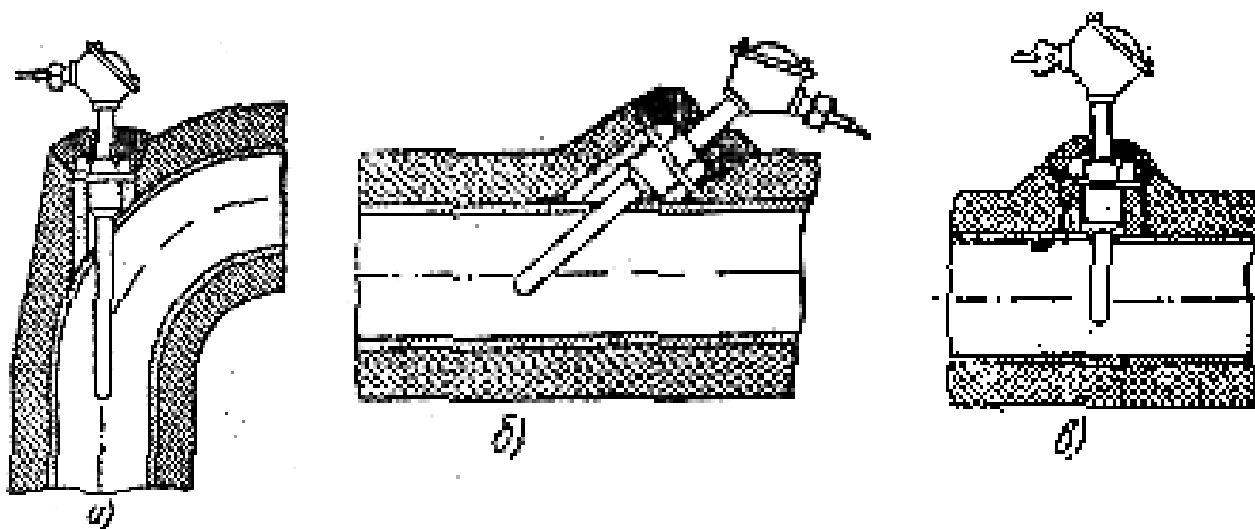


Рис. 2.41 – Схема установки термоприемников в трубопроводах для измерения температуры потоков сред:.

а) - соосная установка; б) - угловая установка; в) - радиальная установка

При измерении температуры жидкостей необходимо соблюдать те же правила, что и при измерении температуры пара и газов. Однако условия при измерении температуры жидкостей более благоприятны, чем при измерении температуры пара или газа, т.к. для жидкостей влияние лучистого теплообмена отсутствует, а коэффициент теплоотдачи для жидкостей значительно больше, чем для газов, поэтому отток тепла от термометра к стенке трубопровода незначителен.

При измерении же температуры твердых тел влияние лучистого теплообмена исключается вообще. Однако, несмотря на эти благоприятные условия, при измерении температуры твердых тел возможны заметные погрешности, особенно в тех случаях, когда тело обладает незначительным коэффициентом теплопроводности.

Если объем измеряемого тела большой, то достаточная глубина погружения термоприемника (термопары, термометра сопротивления и т. д.) вполне обеспечивает равенство температур измеряемого тела и теплочувствительной части термоприемника. Значительные затруднения могут возникнуть при измерении температур в телах с небольшим объемом, особенно при больших температурных перепадах, когда температура в отдельных их точках заметно изменяется. Применяемые для этой цели термоприемники должны иметь малые размеры.

Для того, чтобы термоприемники могли измерять действительную температуру в определенном месте тела, они не должны нарушать температурного поля вследствие утечки тепла по термоприемнику. Между термоприемником и твердым телом должен быть обеспечен хороший тепловой контакт.

Наиболее пригодным для таких измерений является только термопара, теплочувствительная часть которой может быть сделана очень маленькой, чтобы обеспечить измерение температуры в данном месте. Если же требуется измерить среднюю температуру тела, то с успехом может быть также применен термометр сопротивления.

Для уменьшения отвода тепла по электродам термопары от места измерения следует электроды вблизи горячего спая располагать так, чтобы часть их находилась в области с постоянной температурой.

При измерении температуры поверхности твердого тела, омываемого жидкостью или газом, необходимо считаться с тем, что температура ее резко отличается от температуры окружающей среды даже на незначительном расстоянии от поверхности вследствие конвективного теплообмена между

твердым телом и средой. Это обстоятельство предъявляет ряд специфических требований к термоприемникам.

Термоприемник должен иметь хороший контакт с измеряемой поверхностью, он не должен подвергаться воздействию температуры окружающей среды и не должен вызывать в местах измерения изменений температуры вследствие подвода к нему или отвода от него тепла.

Этим требованиям совершенно не удовлетворяют все типы жидкостных термометров, так как чрезвычайно трудно придать их теплочувствительной части форму, которая бы обеспечивала ему хорошее соприкосновение с поверхностью и в то же время не подвергалась воздействию окружающей среды. Кроме того, в жидкостных термометрах рабочее вещество обычно отделено от исследуемой поверхности стеклом, являющимся, как известно, плохим проводником тепла.

На рис. 2.42 показаны различные способы измерения температуры поверхности с помощью термопар.

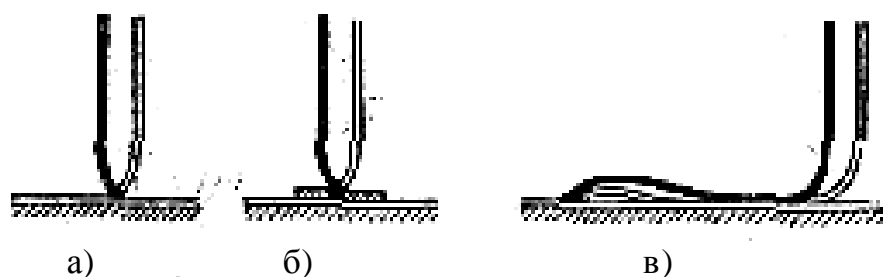


Рис. 2.42 - Способы установки термопар при измерении температуры поверхности

Наиболее неблагоприятный вариант установки термоэлемента показан на рис. 2.42-а. В этом случае термоэлектроды термопары отводят много тепла как от горячего спая, так и от той части поверхности, температура которой должна быть измерена.

Иногда в целях уменьшения влияния утечки тепла увеличивают поверхность соприкосновения горячего спая, припаивая к нему тонкую металлическую (обычно медную) пластинку. Если в этом случае термопара

будет установлена перпендикулярно к поверхности (рис. 2.42-б), то утечка тепла будет такой же, как и в первом случае. Однако количество тепла, отдаваемое каждой отдельной точкой поверхности соприкосновения, уменьшится вследствие наличия медной пластинки, увеличивающей площадь соприкосновения. Благодаря этому и охлаждение в месте соприкосновения горячего спая с поверхностью значительно уменьшится по сравнению с первым случаем, но все же точность измерения будет недостаточной.

Приемлемый способ установки термоэлемента, совершенно устраняющий утечку тепла от места измерения, показан на рис. 2.42-в. Здесь термоэлектроды термопары лежат на некотором протяжении на измеряемой поверхности.

В этом случае также имеет место частичная утечка тепла по термоэлектродам термопары. Но здесь тепло поступает в них по всей длине соприкосновения проволок с поверхностью, вследствие этого отвод от горячего спая уменьшится.

При больших коэффициентах теплоотдачи от газа или жидкости к поверхности (например, при большой скорости газа, омывающего стенку) увеличение поверхности, вызываемое прокладкой термопары, повышает теплоотдачу и тем самым искажает температуру места измерения. В таком случае термопару целесообразно поместить в специально сделанной канавке, закрытой пластинкой из того же материала или же заделанной специальной замазкой.

В некоторых случаях горячий спай термопары, расположенный в канавке, для более надежного соприкосновения припаивают к стенке поверхности.

Рассмотренные способы измерения температуры поверхностей применяются преимущественно при проведении исследовательских работ. В промышленности же для технических целей применяются специальные поверхностные термопары.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют температурные шкалы? Что такое температурная реперная точка? Перечислите известные вам реперные точки.
2. Какие термометры относятся к термометрам расширения?
3. Что является термометрическим веществом в жидкостных термометрах для измерения различных температур?
4. Какого типа манометрические термометры используются при измерении температур? В чем их отличие?
5. Опишите конструкцию и принцип работы манометрического газового термометра.
6. К какому типу термометров относятся биметаллические и дилатометрические термометры? Чем они отличаются друг от друга?
7. Покажите схематически термометры расширения, применяемые в системах регулирования.
8. Запишите основное уравнение термопары. Как определяются термо-э.д.с. для термопар с различными электродами?
9. Какие вторичные приборы используются совместно с термопарами? Опишите принцип их действия.
10. Перечислите стандартные промышленные термопары. Для каких температурных диапазонов измерения они предназначены?
11. Что такое термометр сопротивления? Какие термометры сопротивления и их градуировки вам известны?
12. Какие вторичные приборы используются совместно с термометрами сопротивления? Опишите принцип их действия.
13. Опишите методику установки термоприемников при измерении температуры газов, жидкостей и пара.
14. Какими способами существуют для снижения погрешности измерения температуры?

3. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И ЕГО ПЕРЕПАДОВ

3.1. Общие сведения и единицы измерения давления

Давление является одним из важнейших физических параметров, и его измерение необходимо как в расчетных целях, например для определения расхода, количества и тепловой энергии среды, так и в технологических целях, например для контроля и прогнозирования безопасных и эффективных гидравлических режимов напорных трубопроводов, резервуаров и другого оборудования, используемого на различных предприятиях. Для этих целей применяется большое разнообразие средств измерения давления и его перепадов, различающихся по принципу действия, устройству и точности.

Давлением P называют отношение $P=F/S$ абсолютной величины нормального, то есть действующего перпендикулярно к поверхности тела, вектора силы F к площади S этой поверхности. Если сила равномерно распределена по площади, то указанное отношение задает точное значение давления в каждой ее точке, в противном же случае только его среднее значение. Точное значение давления меняется от точки к точке на поверхности и определяется следующим пределом $\lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS}$ - отношения силы ΔF , приложенной на бесконечно малом участке поверхности, к его площади ΔS . В отличие от силы, величина которой может зависеть от размеров поверхности ее приложения, давление позволяет при рассмотрении взаимодействия физических тел исключить фактор площади, поскольку оно является удельной, т.е., приведенной к единице площади, силой.

При измерении давлений, действующих в различных средах, можно выделить различные его виды.

Так, жидкие и газообразные среды характеризуются *упругими* свойствами, т.е. обратимым изменением объема (уменьшение объема среды при ее сжатии под давлением и восстановления исходного объема после снятия

этого давления), а также **текучестью** – обратимым изменением формы. В этих средах различают давление **внешнее** (поверхностное) - на границе поверхности сред и **внутреннее** - внутри объема или в массе среды. Внешнее давление P на поверхность S жидкой или газообразной среды, равное отношению нормальной составляющей суммы сил F , приложенной извне, к площади поверхности S , передается внутрь среды, как показано на рис.3.1, без изменений и равномерно во все стороны. Таким образом, возникающее при этом внутреннее давление направлено перпендикулярно к любой внутренней площадке среды ΔS , независимо от ее формы и положения в среде, а величина давления в среде в соответствии с законом Паскаля пропорциональна величине выделенной площадки. Очевидно, что $P = F/S = \Delta F/\Delta S$ для любой точки среды.

Внутреннее давление покоящихся жидких и газообразных сред зависит не только от внешнего давления, но и от веса самой среды. Эта зависимость наиболее существенна для жидкостей, обладающих большей плотностью, чем газы.

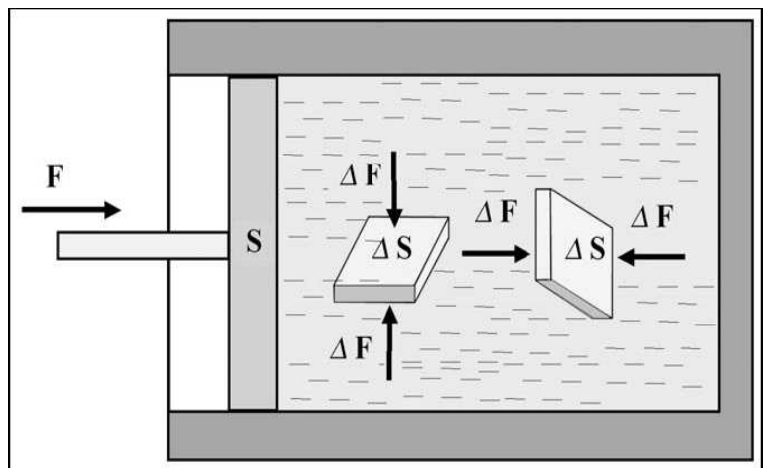


Рис.3.1 - Силы давления в жидкой и газообразной средах:
 F - внешняя сила; S - свободная поверхность (площадь) среды; ΔF - сила давления на внутреннюю площадку ΔS .

Положение точки измерения относительно горизонтальных поверхностей равно давления определяет

весовую составляющую внутреннего давления - **гидростатическое давление**.

Закон Паскаля справедлив не только для покоящихся, но и для движущихся сред, если их считать идеальными (отсутствует трение между слоями среды - **вязкость**). В вязких движущихся средах величина внутреннего давления зависит от направления, и поэтому под внутренним давлением среды

следует понимать его усредненное значение по трем взаимно перпендикулярным направлениям в точке измерения. **Полное внутреннее давление** в движущейся среде, например, горизонтального напорного трубопровода определяется суммой внешнего, гидростатического и **гидродинамического давления - скоростного напора**, а также потерями давления на трение по всей длине трубы и вихревыми потерями при изменениях величины и направления потока в **гидравлических сопротивлениях** (колена, задвижки, диафрагмы и др.). В напорных трубопроводах, как правило, измеряется **статическое давление**, которое является разностью полного и динамического давлений. Статическое давление измеряется также для большинства технических объектов. Динамическое давление учитывается только при определении скоростных характеристик потоков в расходомерах и счетчиках количества среды.

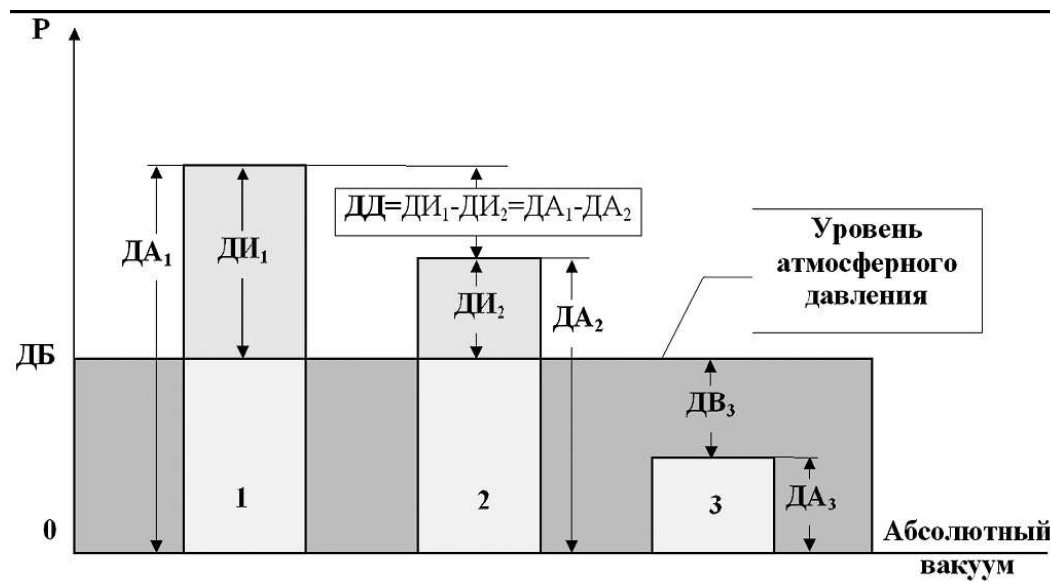


Рис.3.2 - Виды давлений в физических точках 1,2,3 различных процессов: ДБ - давление барометрическое, ДА - давление абсолютное, ДИ - давление избыточное, ДВ - давление вакуумметрическое, ДД - давление дифференциальное

На практике давление газов и жидкостей обычно измеряется относительно двух различных уровней (см. рис.3.2): 1- уровня абсолютного вакуума, или абсолютного нуля давления (состояние среды в замкнутом

объеме, если бы оттуда были удалены все молекулы); 2 - уровня атмосферного, или барометрического, давления.

Давление, измеряемое относительно вакуума, называют давлением **абсолютным** (ДА). **Барометрическое давление** (ДБ) - это абсолютное давление земной атмосферы. Оно зависит от конкретных условий измерения: температуры воздуха и высоты над уровнем моря. Давление, которое больше или меньше атмосферного, но измеряется относительно атмосферного, называют соответственно **избыточным** (ДИ) или давлением разрежения, **вакуумметрическим** (ДВ). Очевидно, что $ДА = ДБ + ДИ$ или $ДА = ДБ - ДВ$. Разность давлений сред в двух различных процессах или двух точках одного процесса, при котором ни одно из давлений не является атмосферным, называют **дифференциальным давлением** (ДД).

В настоящее время при измерении давления часто пользуются как системными, так и внесистемными единицами давления.

В соответствии со стандартом (СТ СЭВ 1052-89) единицы давления определяются одним из двух способов:

- через высоту столба жидкости, уравнивающей измеряемое давление в конкретном физическом процессе в единицах водяного столба при 4°C (*мм вод. ст.* или *м вод. ст.*) или ртутного столба при 0°C (*мм рт. ст.*, или *Torr*) при нормальном ускорении свободного падения. В англоязычных странах используются соответствующие единицы *in* H_2O - дюйм вод. ст. или *ft* H_2O - фут вод. ст, а также *in* Hg - дюйм рт. ст.; (1 дюйм=25,4 мм, 1 фут=30,48 см);
- через единицы силы и площади. В Международной системе единиц (СИ), принятой в 1960 году, единицей давления является *Па* (Паскаль), определяемая действием силы в 1 Н (ньютон) на единицу поверхности 1 м^2 . Отсюда $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$, а ее производные соответственно - *килопаскаль* ($1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$), *мегапаскаль* ($1 \text{ МПа} = 10^3 \text{ кПа} = 10^6 \text{ Па}$) и т.д.

Наряду с системой СИ в области измерения давления продолжают использоваться единицы и других, более ранних систем, а также внесистемные

единицы. В технической системе единиц МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда) сила измеряется в килограммах силы ($1 \text{ кгс} \approx 9,8 \text{ Н}$). Единицы давления в МКГСС - $\text{кгс}/\text{м}^2$ и $\text{кгс}/\text{см}^2$. Единица $\text{кгс}/\text{см}^2$ получила название **технической**, или **метрической атмосферы (ат)**. В случае измерения в единицах технической атмосферы избыточного давления используется обозначение (*ати*). В физической системе единиц СГС (сантиметр, грамм, секунда) единицей силы является *дина* ($1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н}$). В рамках СГС введена единица давления *бар* ($1 \text{ бар} = 1 \text{ дин}/\text{см}^2$). Существует одноименная внесистемная, метеорологическая единица **бар**, или **стандартная атмосфера** ($1 \text{ бар} = 10^6 \text{ дин}/\text{см}^2$; $1 \text{ мбар} = 10^{-3} \text{ бар} = 10^3 \text{ дин}/\text{см}^2$). Кроме указанных единиц на практике используется такая внесистемная единица, как **физическая**, или **нормальная атмосфера (атм)**, которая эквивалентна уравнивающему столбу 760 мм рт. ст. В англоязычных странах широко распространена единица давления **пси** ($\text{psi} = 1 \text{ lbf}/\text{in}^2$) - **фунт силы на квадратный дюйм** ($1 \text{ фунт} = 0,4536 \text{ кг}$). При измерении абсолютного и избыточного давления используются соответственно обозначения **psia** (absolute - абсолютный) и **psig** (gage - избыточный).

Соотношения между применяемыми единицами давления приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Соотношение между единицами давления

Единицы	Па	кгс/м ²	кгс/см ²	мм вод.ст.	мм рт.ст.	атм	бар
1 Па	1	0,10197	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	0,101197	$7,50 \cdot 10^{-3}$	$0,987 \cdot 10^{-5}$	10^{-5}
1 кгс/м ²	9,8066	1	10^{-4}	1	$73,56 \cdot 10^{-3}$	$9,678 \cdot 10^{-5}$	$9,810^{-5}$
1 кгс/см ²	$98,06 \cdot 10^{-3}$	10^4	1	10^4	735,56	0,96784	0,98066
1 мм вод.ст.	9,8066	1	10^{-4}	1	$73,5610^{-3}$	$9,678 \cdot 10^{-5}$	$9,806 \cdot 10^{-5}$
1 мм рт.ст.	133,322	13,595	$13,595 \cdot 10^{-4}$	13,595	1	$1,3158 \cdot 10^{-3}$	$1,333 \cdot 10^{-3}$
1 атм	$1,0133 \cdot 10^{-5}$	10332	1,0332	10332	760	1	1,01325
1 бар	10^5	10197,2	1,0197	10197,2	750,06	0,98692	1

Исходя из приведенной таблицы, например, определяем, что одной технической атмосфере соответствует давление 0,980665 в барах (здесь бар

является внесистемной единицей). Однако, в действительности не всегда требуется столь высокая точность перевода единиц. Для приблизительных оценок и расчетов давления с относительной погрешностью не более 0,5% используются следующие соотношения:

$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 0,97 \text{ атм} = 0,98 \times 10^3 \text{ мбар} = 0,98 \text{ бар} = 10^4 \text{ мм вод.ст.} = 10 \text{ м вод.ст.} = 735 \text{ мм рт.ст.} = 0,98 \times 10^5 \text{ Па} = 98 \text{ кПа} = 0,098 \text{ МПа}.$

При оценке величины давления с точностью в 2% допускается, что $1 \text{ ат} = 1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа}$, а с ошибкой в 3% - $1 \text{ ат} = 1 \text{ атм}$.

Диапазон давлений, измеряемых в технике, достаточно широк: от 10^{-8} Па в электровакуумном оборудовании до 103 МПа при обработке металлов давлением.

Для воспроизведения единиц давления используются первичные (национальные) и вторичные (рабочие) эталоны давления. Для поддиапазона 1-100 кПа избыточных, абсолютных и разностных давлений в качестве первичного эталона используется, как правило, ртутный двухтрубный (U-образный) манометр с лазерным считыванием высоты мениска. Погрешность считывания для данного эталона не более 10^{-3} мм , а абсолютная суммарная погрешность прибора, учитывающая в том числе влияние температуры, не превышает 0,0005% от верхней границы диапазона. Для поддиапазона 100 кПа - 100 МПа применяются газовые грузопоршневые манометры с точностью 0,0035-0,004% от показаний. Газовые и жидкостные грузопоршневые манометры используются и как рабочие эталоны для передачи единиц давления промышленным образцовым приборам, их точность составляет 0,01-0,1%.

3.2. Классификация средств измерения давления

Для прямого измерения давления жидкой или газообразной среды с отображением его значения непосредственно на шкале, табло или индикаторе первичного измерительного прибора применяются **манометры** (ГОСТ 8.271-77). Если отображение значения давления на самом первичном приборе не производится, но он позволяет получать и дистанционно передавать соответствующий измеряемому параметру сигнал, то такой прибор называют **измерительным преобразователем давления (ИПД)**, или **датчиком**

давления. Однако возможно и объединение этих двух свойств в одном приборе, который называется манометром-датчиком.

Манометры классифицируют по принципу действия и конструкции, по виду измеряемого давления, по применению и назначению, по типу отображения данных и другим признакам. На рис. 3.3 приведена схема классификации приборов для измерения различных видов давления.

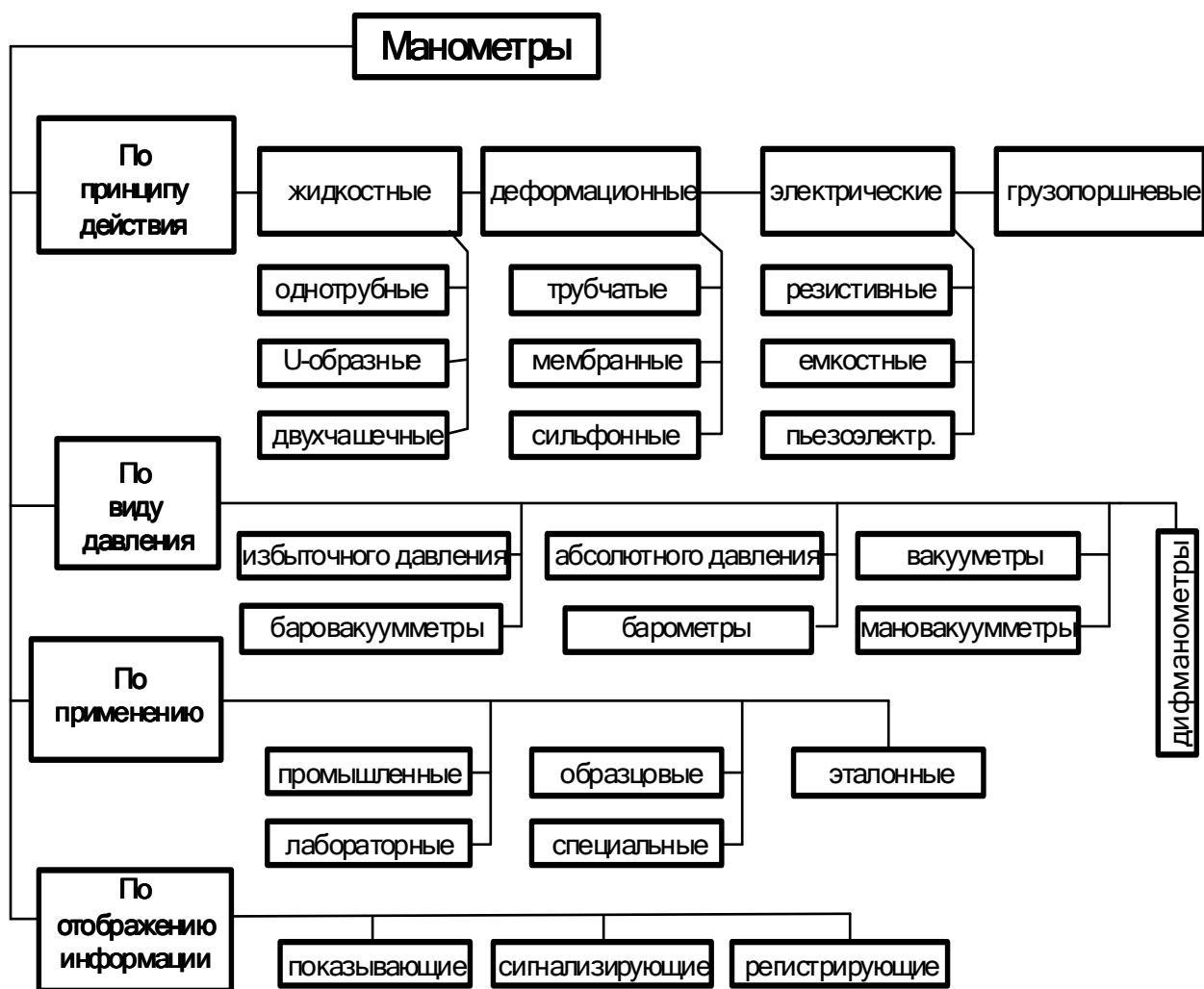


Рис. 3.3 - Классификация приборов измерения давления

По принципу действия манометры можно подразделить на следующие:

- **жидкостные** - измеряемое давление уравнивается гидростатически столбом воды, ртути или другой жидкости соответствующей высоты;

- **деформационные** - давление определяется по величине деформации и перемещения упругого чувствительного элемента (УЧЭ), представляющего собой мембрану, трубчатую пружину или сильфон;
- **грузопоршневые** - измеряемое или воспроизводимое давление гидростатически уравнивается через жидкую или газообразную среду прибора давлением веса поршня, нагружаемого образцовыми гирями;
- **электрические** - давление определяется на основании зависимости электрических параметров: сопротивления, емкости, заряда, частоты колебаний чувствительного элемента (ЧЭ) от измеряемого давления;

В промышленности при локальных измерениях давлений энергоносителей и других сред в большинстве случаев используются деформационные манометры, использующие одновитковую трубчатую пружину, называемую трубкой Бурдона - для непосредственно показывающих стрелочных приборов или с многовитковыми пружинами для самопишущих манометров.

В настоящее время на смену этим манометрам всё больше приходят электрические манометры с цифровым табло и развитой системой интерфейсов для связи с вычислительно-управляющей техникой.

По виду измеряемого давления манометры подразделяют на приборы измерения избыточного и абсолютного давления - собственно манометры, разрежения - **вакуумметры**, давления и разрежения - **мановакуумметры**, атмосферного давления - **барометры** и разностного давления - **дифференциальные манометры** (дифманометры). Манометры, вакуумметры и мановакуумметры для измерения небольших (до 20-40 кПа) давлений газовых сред называют соответственно **напоромерами**, **тягомерами** и **тягонапоромерами**, а дифманометры с таким же диапазоном измерения - **микроманометрами** (ГОСТ 8.271-77). Технические характеристики всех этих средств измерения давления определяются соответствующими общими техническими условиями (ГОСТ 2405-88, ГОСТ 18140-81 и другими).

По области применения манометры подразделяют на следующие:

- **общепромышленные** (технические), работающие в промышленных условиях (при перепадах температур и влажности окружающей среды, вибрациях, загрязнениях внешней среды и т.п.);
- **лабораторные** (приборы повышенной точности) для использования в стабильных условиях лабораторий);
- **специальные**, которые применяют в экстремальных условиях: на транспорте, котельных установках, при работе с агрессивными средами и т.п.;
- **образцовые**, служащие для поверки рабочих манометров;
- **эталонные** - хранители единиц давления с целью передачи их образцовым приборам.

По способу отображения значений измеряемого давления существуют следующие типы манометров:

- **показывающие**, у которых считывание данных производится непосредственно по аналоговой (стрелочной) или цифровой шкале прибора;
- **сигнализирующие** (электроконтактные) - с выдачей управляющего электрического сигнала путем замыкания или размыкания контактов при достижении измеряемым давлением заранее установленного контрольного значения;
- **регистрирующие** (самопишущие) - с записью в память значений давления как функции времени и их отображением на электронном табло или диаграммной бумаге.

Манометры выполняют функцию локального контроля и в большинстве случаев из-за отсутствия возможности дистанционного доступа к их показаниям, за исключением манометров с унифицированным выходным электрическим сигналом, не могут быть использованы для целей современной автоматизации.

3.3. Жидкостные приборы давления

3.3.1. Манометры U- образные и чашечные

Жидкостные приборы, основанные на гидростатическом принципе действия, широко применяют для измерения давления и разрежения, а также разности давлений. Несмотря на то, что, кроме жидкостных приборов, имеется достаточное количество современных приборов, основанных на других способах измерения давления, все же они до сих пор широко применяются как в лабораторной практике, так и в различных отраслях промышленности. Причина этого - простота обращения, относительно высокая точность измерения и их дешевизна.

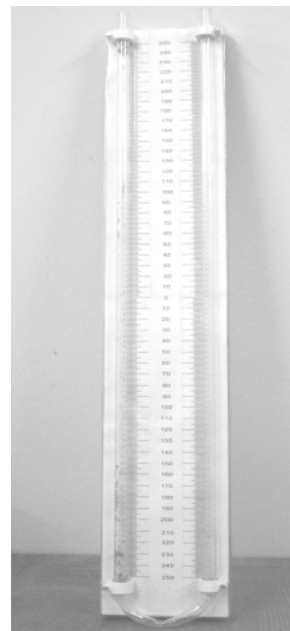
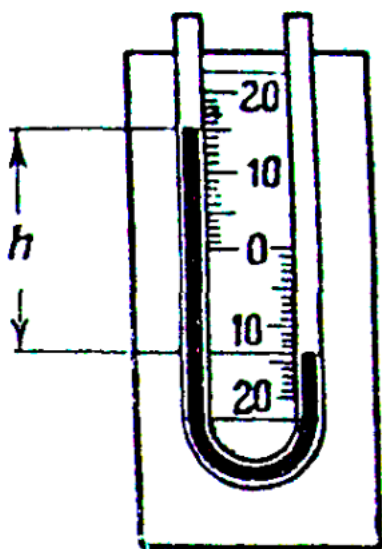


Рис. 3.4 - U- образный манометр

U-образный манометр - простейший и вместе с тем точный прибор для измерения давления, разрежения, а также разности давлений, схема и внешний вид которого показаны на рис. 3.4.

Основными элементами U-образного манометра являются U-образная стеклянная (либо из другого прозрачного материала) трубка, заполненная до половины своей высоты рабочей жидкостью, и миллиметровая шкала, нанесенная на плоскость основания прибора. Принцип измерения давления с помощью этого прибора основан на непосредственном наблюдении разности

уровней h рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости обычно применяют ртуть и воду. Однако при точных измерениях давления капиллярные свойства воды не позволяют применять ее в качестве рабочей жидкости в U-образных манометрах со стеклянными трубками малого диаметра. В этом случае в качестве рабочей жидкости следует применять спирт или толуол.

Если одна из трубок прибора соединена с объектом, где необходимо измерить давление, а другая остается открытой, т.е. соединенной с атмосферой, то величина измеряемого давления p может быть определена по общеизвестной формуле:

$$p = \rho \cdot g \cdot h, \quad (3.1)$$

где p - избыточное давление, Па;

h - разность уровней рабочей жидкости, м;

ρ – плотность рабочей жидкости кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Если с помощью U-образного манометра давление измеряют в миллиметрах столба данной жидкости, то $p = h$.

U-образный манометр, как было сказано выше, может быть использован и для измерения разрежения, т.е. как вакуумметр, а также и как дифференциальный манометр для измерения разности давлений.

Если отсчет высоты столба по U-образному манометру производят невооруженным глазом, то абсолютная погрешность в измерении высоты столба может быть оценена в 1 мм.

При этом погрешностью определения плотности рабочей жидкости можно пренебречь, т.к. она очень мала по сравнению с погрешностью отсчета. Поскольку в U-образном приборе необходимо делать два отсчета (отдельно в каждом колене прибора), то в этом случае наибольшая абсолютная погрешность может достигнуть 2 мм. Отсюда следует, что относительная погрешность при измерении давления, разрежения или разности давлений U-

образным манометром зависит в основном от высоты столба рабочей жидкости и точности его отсчета.

Для увеличения точности отсчета столба рабочей жидкости образцовые U-образные манометры снабжаются зеркальной шкалой, в этом случае при цене деления шкалы в 1 мм отсчет высоты столба может быть произведен с погрешностью 0,25 мм. Если учесть, что необходимо производить два отсчета, то общая погрешность будет не менее 0,5 мм.

При измерении очень малых давлений, выражающихся высотой столба жидкости всего лишь в несколько миллиметров, U-образный манометр становится весьма грубым и его заменяют прибором, который называется микроманометром. При измерении относительно больших давлений U-образный манометр неудобен, т.к. для этого требуется значительная длина его колен, что вызывает определенные трудности, особенно в промышленной эксплуатации.

Чашечный манометр представляет собой разновидность U-образного манометра, у которого одно колено трубки выполнено в виде сосуда с сечением, значительно большим, чем второе. Измеряемое давление, действуя на поверхность рабочей жидкости в широком сосуде, заставляет ее подниматься вверх по стеклянной измерительной трубке. На рис. 3.5 представлена схема чашечного манометра.

Пусть под действием измеряемого давления жидкость в измерительной трубке поднимется на высоту h_1 , а в широком сосуде опустится на h_2 , тогда высота столба, соответствующая действительному давлению, будет равна:

$$h = h_1 + h_2 . \quad (3.2)$$

Если F_1 - площадь сечения измерительной трубки, а F_2 - широкого сосуда, то объем вытесненной жидкости в обеих трубках будет равен в соответствии с выражением:

$$F_1 \cdot h_1 = F_2 \cdot h_2 . \quad (3.3)$$

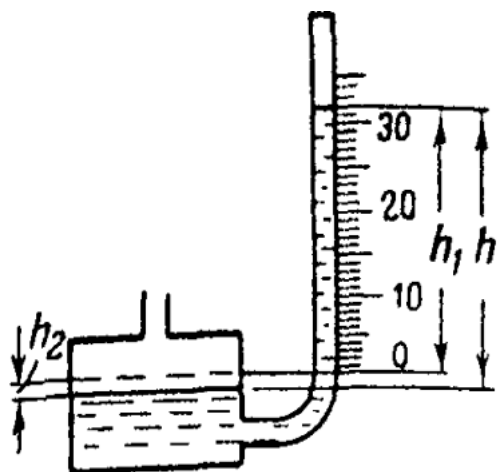


Рис. 3.5 - Схема чашечного манометра

Решая уравнения (3.2) и (3.3) относительно h , получим:

$$h = h_1 \cdot \left(1 + \frac{F_1}{F_2} \right), \quad (3.4)$$

На рис.3.6 приведен вид лабораторного чашечного манометра.

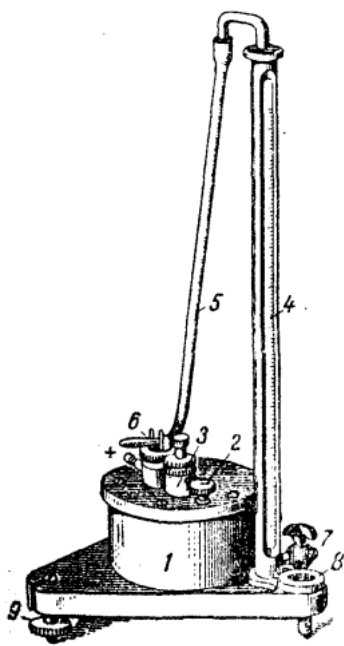


Рис. 3.6 - Общий вид чашечного манометра:

1-сосуд; 2-заливная пробка; 3-установка нуля; 4-трубка со шкалой; 5-переточная трубка; 6-многоходовой кран; 7-спускной кран; 8-уровень; 9-винтовая ножка

т. е. действительная высота столба h больше отсчитываемой на величину $h_1 \cdot \frac{F_1}{F_2}$ или $h_1 \cdot \frac{d^2}{D^2}$, где d – внутренний диаметр измерительной трубки, а D – широкого сосуда.

Для получения результата измерения в системных единицах давления выражение (3.4) с учетом плотности рабочей жидкости примет вид:

$$p = \rho \cdot g \cdot h_1 \cdot \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right). \quad (3.5)$$

Основным достоинством чашечного манометра перед U-образным является то, что он позволяет производить один отсчет, т.к. разностью высот в широком сосуде можно пренебречь, либо учесть путем введения поправки.

Пример 3.1. Определить поправочный множитель для чашечного манометра, если диаметр широкого сосуда $D = 100$ мм, диаметр измерительной трубки $d = 5$ мм, а также величину измеренного давления при подъеме рабочей жидкости (воды) в измерительной трубке на 150 мм.

Исходя из соотношения (3.5), очевидно, что при повышении рабочей жидкости в измерительной трубке на какую-либо высоту, в широком сосуде рабочая жидкость опустится на величину, соответствующую $\frac{d^2}{D^2} = \frac{5^2}{100^2} = 0,0025$ этой высоты, т.е. на 0,25 %.

При этом истинное давление, подведенное к манометру, составит

$$p = \rho g h_1 \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right) = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,150 \cdot 1,0025 = 1,475 \text{ (кПа)}.$$

На практике чашечные манометры, несмотря на то, что их шкала градуирована в миллиметрах водяного столба, заполняются спиртом плотностью $0,81 \text{ г/см}^3$, а образцовые приборы для увеличения точности отсчета снабжаются зеркальной шкалой.

Микроманометры являются лабораторными приборами и предназначены для измерения малых давлений, разрежений или незначительных разностей давлений, определяемых несколькими миллиметрами водяного столба. Применять описанные выше U-образные и чашечные манометры для измерения указанных давлений не оправдано из-за большой погрешности этих приборов. Для уменьшения погрешности в таких приборах применяют специальные оптические устройства, или трубке чашечного манометра придается наклонное положение.

При производстве технических измерений и измерений, требующих относительно быстрого отсчета, нашли широкое применение микроманометры с наклонной трубкой, так как микроманометры, снабженные оптическими устройствами, в этом случае неудобны.

На рис.3.7 схематически показан микроманометр с переменным наклоном измерительной трубки типа ММН и его общий вид.

При измерении давления его импульс подводится к широкому сосуду, а при измерении разрежения - к наклонной трубке. В случае измерения разности давлений большее давление подводят к широкому сосуду, а меньшее - к трубке.

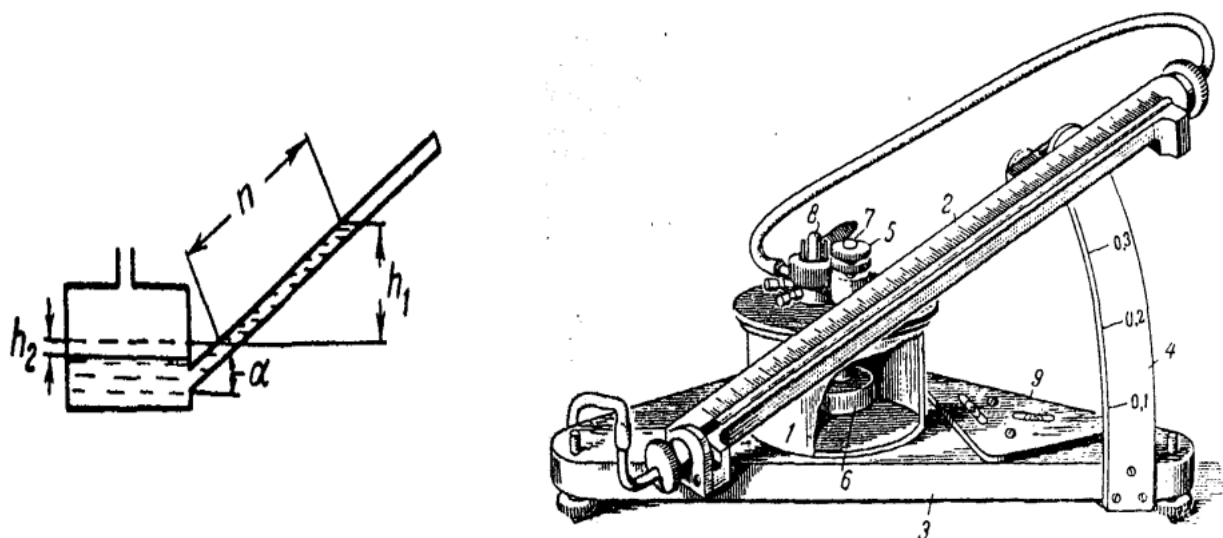


Рис. 3.7 - Схема и общий вид микроманометра с наклонной трубкой:
1 - широкий сосуд; 2 - наклонная трубка; 3 - постамент; 4 - установочная стойка; 5 - установка нуля; 6 - регулировочный цилиндр; 7 - регулировочный винт; 8 - многоходовой кран

Под действием измеряемого давления уровень рабочей жидкости в трубке, наклоненной к горизонту под углом α , поднимется по вертикали на высоту h_1 , а в широком сосуде опустится на h_2 . Тогда разность высот в приборе будет равна: $h = h_1 + h_2$, где $h_1 = n \cdot \sin \alpha$ (здесь n – перемещение рабочей жидкости в наклонной трубке, α – угол наклона измерительной трубки).

Если F_1 – площадь сечения измерительной, а F_2 – площадь сечения широкого сосуда, то высота подъема жидкости в трубке определится в соответствии с выражением

$$h = n \cdot \left(\sin \alpha + \frac{F_1}{F_2} \right) \quad \text{или} \quad p = \rho \cdot g \cdot h = \rho \cdot g \cdot n \cdot \left(\sin \alpha + \frac{F_1}{F_2} \right). \quad (3.6)$$

В данном приборе с изменением наклона трубки изменяется предел измеряемых давлений. Чем меньше угол наклона α , тем меньше предел измерения и тем выше точность измерений при одной и той же шкале и рабочей жидкости. Однако, угол наклона $\alpha < 15^\circ$ приводит к увеличению неточности показаний за счет размывания (вытягивания) мениска в измерительной трубке.

Шкала микроманометра ММН градуируется в мм водяного столба для рабочей жидкости – спирта. Микроманометры данного типа выпускаются с классом точности 0,5 и 1,0.

Для более точных измерений в лабораторных условиях применяются чашечные микроманометры с оптическим устройством, например микроманометр типа АД конструкции Е.Ф.Долинского, имеющие класс точности 0,05 и 0,1.

При использовании жидкостных приборов, предназначенных для измерения давления, необходимо принимать во внимание неизбежные погрешности вследствие неточности отсчета по шкале высоты столба жидкости.

При производстве точных измерений, кроме этого, необходимо учитывать погрешности, обусловленные влиянием температуры и ускорением силы тяжести.

Как было сказано выше, при измерении давления или разрежения жидкостными приборами за меру давления принимают высоту столба жидкости h , выраженную в миллиметрах водяного столба или миллиметрах ртутного столба, при этом столб жидкости относят соответственно к 4°C для воды или к 0°C для ртути и нормальному ускорению силы тяжести ($9,8066 \text{ м/с}^2$). В действительности же высота столба жидкости по манометру отсчитывается при некоторых рабочих значениях температуры и ускорения силы тяжести. Поэтому необходимо непосредственный отсчет по манометру корректировать, т. е. приводить его показания к нормальным условиям. При этом длину шкалы

жидкостного прибора обычно приводят к 20 °С, т.к. деления шкалы наносятся и выверяются при этой температуре.

Если h_t - разность уровней рабочей жидкости в приборе, отсчитанная при температуре t , то разность уровней h_0 при нормальной температуре t_0 в общем виде будет равна:

$$h_0 = h_t \cdot \frac{1 + \alpha \cdot (t - 20)}{1 + \beta \cdot (t - t_0)} \quad (3.7)$$

или

$$h_0 = h_t \cdot \{1 - [\beta \cdot (t - t_0) - \alpha \cdot (t - 20)]\}, \quad (3.8)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала шкалы, град⁻¹;

β – коэффициент расширения рабочей жидкости при 20 °С, град⁻¹.

Определив величину h_0 при нормальной температуре t_0 и ускорении свободного падения в месте измерения, находят высоту столба h_H , соответствующую нормальному ускорению падения по формуле

$$h_H = h_0 \cdot \frac{g_\phi}{g}, \quad (3.9)$$

где g и g_ϕ – ускорение свободного падения нормальное и в данной местности, соответственно, м/с².

Подставляя значение h_0 из формулы (3.7) в (3.8), соответственно получим:

$$h_H = h_t \cdot \frac{g_\phi}{g} \cdot \{1 - [\beta \cdot (t - t_0) - \alpha \cdot (t - 20)]\}. \quad (3.10)$$

3.3.2. Барометры ртутные

Барометры предназначены для измерения атмосферного давления. Применение их в технике необходимо главным образом при определении абсолютного давления. Ртутные барометры различают двух типов: чашечные и сифонные. Наиболее распространенными являются чашечные барометры.

На рис.3.8 показан ртутный чашечный барометр. В барометре этого типа стеклянный сосуд и трубка заключены в металлическую оправу 3. В верхней

части этой оправы имеется сквозная прорезь 1 для наблюдения поверхности мениска ртути. Вдоль прорези на оправе нанесены деления шкалы с учетом изменения уровня ртути в сосуде 2. В прорези оправы помещен специальный визир 5, снабженный нониусом, передвигаемый при помощи винта 4.

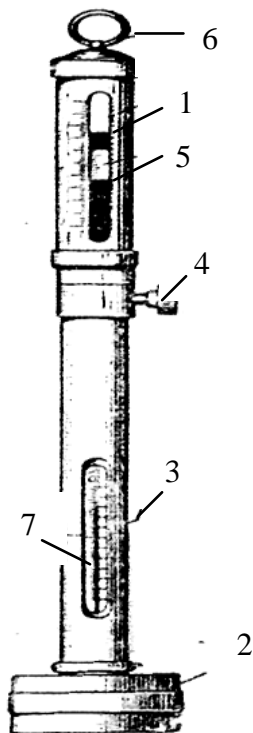


Рис. 3.8 - Барометр ртутно-чашечный

Этим винтом осуществляется точная наводка визира на вершину мениска ртути, обеспечивая тем самым надлежащую точность отсчета. Барометр должен находиться в вертикальном положении, для чего он свободно подвешивается на кольце 6. Снаружи к прибору прикреплен термометр 7, по которому контролируется температура ртутного столба и шкалы барометра. Шкалы барометров градуируют в миллиметрах ртутного столба или в миллибарах. За меру барометрического давления, как известно,

принимают высоту ртутного столба, выраженную в миллиметрах или миллибарах при 0°C и нормальном ускорении силы тяжести. В действительности же высота ртутного столба по барометру отсчитывается при иных значениях температуры и ускорения силы тяжести.

Поэтому, как и в предыдущем случае, непосредственный отсчет по барометру необходимо корректировать, т.е. приводить его показания к нормальным условиям, пользуясь для этой цели формулой:

$$h_H = h_6 \cdot [1 - (\beta - \alpha) \cdot t] \cdot \frac{g_0}{g}, \quad (3.11)$$

где h_6 - высота ртутного столба, отсчитанная по барометру при температуре t , мм; β - коэффициент расширения ртути; α - коэффициент линейного расширения материала шкалы барометра;

остальные обозначения соответствуют, принятым в формуле (3.10).

Значение ускорения свободного падения для данной местности может быть определено по следующей формуле

$$g_{\phi} = g \cdot [1 - 0,0026 \cdot \cos \phi - 2 \cdot 10^{-7} \cdot H], \quad (3.12)$$

где ϕ – географическая широта; H – высота над уровнем моря, м.

Для точного определения барометрического давления по ртутному барометру необходимо вводить поправки:

- на инструментальную погрешность прибора C_1 (указывается в паспорте прибора);
- на температуру C_2 , определяемую в соответствии с формулой $C_2 = h_t \cdot (\beta - \alpha) \cdot t$;
- на ускорение свободного падения C_3 , определяемое в соответствии с формулой: $C_3 = h_0 \cdot (\frac{g_{\phi}}{g} - 1)$.

Таким образом, действительная величина барометрического давления с учетом всех поправок должна определяться в соответствии с выражением:

$$h_H = h_0 + C_1 + C_2 + C_3. \quad (3.13)$$

При необходимости узнать барометрическое давление в данной местности поправка C_2 в уравнение (3.13) не вводится.

3.4. Приборы давления с упругими чувствительными элементами

Приборы давления основаны на использовании деформации или изгибающего момента упругих чувствительных элементов (УЧЭ), воспринимающих давление среды и преобразующих его в перемещение или усилие. Эти приборы применяют в различных отраслях техники для широкого диапазона измерения давления – от 50 Па до 1000 МПа. Они изготавливаются в виде манометров, вакуумметров, тягомеров, напорометров, тягонапорометров и мано-вакуумметров. Приборы давления с УЧЭ подразделяются на следующие типы:

- приборы прямого действия показывающие и самопишущие, у которых перемещение центра или свободного конца УЧЭ вызываемое действием давления, преобразуется в перемещение отсчетного устройства (стрелки) для показания или для показания и записи измеряемой величины на диаграммной бумаге;
- приборы давления прямого действия и реле давления (без отсчетных устройств), снабженные электроконтактами и предназначенные в основном для сигнализации отклонения давления от заданного значения, а также для работы в схемах защиты, блокировки или позиционного регулирования.
- первичные приборы давления, с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированными выходными токовыми или пневматическими сигналами для дистанционной передачи информации. Приборы этого типа могут использоваться в системах автоматического регулирования и управления, а также подключаться ко вторичным приборам и к вычислительной технике.

В зависимости от назначения приборы давления с упругими чувствительными элементами подразделяются на образцовые и рабочие.

В качестве упругих чувствительных элементов в этих приборах используются мембраны, мембранные коробки, сильфоны и трубчатые пружины, которые также применяются в дифманометрах.

Одной из основных характеристик упругого чувствительного элемента является зависимость перемещения его рабочей точки λ от действующей нагрузки p (давления или разности давлений). Статическая характеристика УЧЭ $\lambda = f(p)$ в зависимости от его конструкции и способа нагружения может быть линейной и нелинейной. Обычно предпочитают УЧЭ с линейной статической характеристикой, а в случае нелинейной характеристики для получения равномерной шкалы прибора применяются различные спрямляющие устройства.

Важными параметрами, определяющими рабочие качества упругого чувствительного элемента, являются его жесткость и чувствительность -

величина, обратная жесткости. Если статическая характеристика УЧЭ линейна, то жесткость равна отношению силы давления к соответствующему перемещению:

$$k = \frac{p}{\lambda} \quad (\text{Па/м}) \quad . \quad (3.14)$$

Чувствительность упругого элемента представляет собой величину, обратную жесткости:

$$S = \frac{\lambda}{p} \quad (\text{м/Па}) \quad . \quad (3.15)$$

При нелинейной статической характеристике УЧЭ жесткость и чувствительность определяются по следующим выражениям:

$$k = \frac{dp}{d\lambda} \quad (\text{Па/м}) \quad \text{и} \quad S = \frac{d\lambda}{dp} \quad (\text{м/Па}). \quad (3.16)$$

Перемещение рабочей точки (участка) УЧЭ под действием давления или разности давлений определяется влиянием сосредоточенной силой давления, определяемой по следующим выражениям:

$$q = p \cdot F_{\text{эф}} \quad \text{или} \quad q = \Delta p \cdot F_{\text{эф}} \quad , \quad (3.17)$$

где q — сила давления на УЧЭ, Н;

Δp — перепад (разность) давлений, Па;

$F_{\text{эф}}$ — эффективная площадь УЧЭ, м².

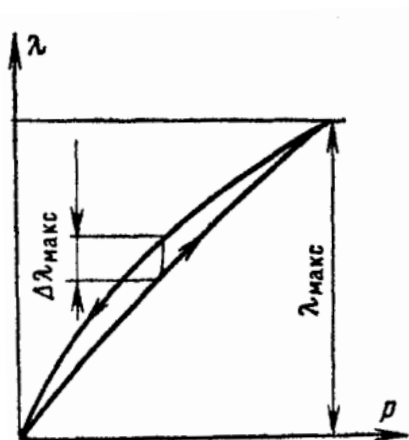


Рис. 3.9 - Статическая характеристика УЧЭ с гистерезисом

Для обеспечения надежной работы упругого чувствительного элемента необходимо, чтобы величина напряжений, возникающих в материале его под действием внешних и внутренних сил, не превышала предела упругости.

Вследствие несовершенства упругих свойств реальных материалов статическая характеристика $\lambda = f(p)$ чувствительного элемента при увеличении и уменьшении

нагрузки в пределах упругих деформаций неоднозначна и образует так называемую петлю гистерезиса (см. рис. 3.9). Величина гистерезиса является важной характеристикой, т.к. он определяет погрешность прибора. Существенное влияние на гистерезис оказывают химический состав, структура материала и значение напряжений в материале чувствительного элемента. Гистерезис выражается обычно в процентах и вычисляется по следующей формуле:

$$\delta_{\Gamma} = \frac{\Delta\lambda_{\max}}{\lambda_{\max}} \cdot 100. \quad (3.18)$$

Определение величин $\Delta\lambda_{\max}$ и λ_{\max} производится экспериментальным путем в соответствии с рис. 3.9.

Несовершенство свойств материала УЧЭ может влиять и на изменение его деформаций во времени при приложении одинаковых нагрузок. Такое явление называется **последствием**. Различают следующие виды последствий: упругое, пластическое и релаксацию.

При упругом последствии упругие элементы после снятия напряжения в течение некоторого времени возвращаются в исходное состояние, в результате чего стрелка прибора не сразу возвращается на нуль. Упругое последствие, складываясь с «чистым» гистерезисом, дает увеличение петли гистерезиса.

Стабильность характеристик упругого чувствительного элемента во времени может измениться вследствие пластической ползучести материала, которое может возникнуть при нормальной температуре и напряжениях, меньших предела упругости. Это связано с неоднородностью структуры материала и появлением в его микрообъемах остаточных напряжений при изготовлении. Пластическое течение материала во времени проявляется в форме пластического последствия и релаксации.

Под пластическим последствием понимают явление, при котором некоторая часть деформации в чувствительном элементе сохраняется при полной его разгрузке по истечении любого интервала времени. Известно, что

увеличение пластической деформации приводит к уменьшению упругой деформации, а вместе с тем к уменьшению напряжений в материале чувствительного элемента. По истечении достаточно длительного времени напряжения в чувствительном элементе могут полностью исчезнуть.

Ослабление напряжений с течением времени при условии постоянной деформации называется релаксацией напряжений. Интенсивная релаксация напряжений в упругом чувствительном элементе может быть причиной выхода его из строя и разрушения.

Для уменьшения релаксации и последствий чувствительные элементы при изготовлении подвергаются стабилизации – специальной технологической обработке, при которой пластическое течение материала заканчивается.

Упругие чувствительные элементы изготавливаются из пластичных материалов, обладающих необходимой упругостью. К таким материалам относятся дисперсионно-твердеющие сплавы бронзы Бр.Б2; Бр.Б2,5, сталь НЗ6ХТЮ и др.

При использовании приборов давления с упругими чувствительными элементами могут возникать дополнительные температурные погрешности, связанные с изменением линейных размеров чувствительного элемента.

3.4.1. Упругие чувствительные элементы

В качестве упругих чувствительных элементов в приборах давления широко используются разного рода мембраны, мембранные коробки и блоки, трубчатые пружины и сильфоны.

Плоские мембраны. Плоские мембраны изготавливаются из стали и бронзы, представляют собой круглые тонкостенные пластины постоянной толщины, заделываемые по краям в камеру приема импульса давления. Эти мембраны под действием равномерно распределенного давления прогибаются при наличии не только изгибных деформаций, но и растягивающих напряжений и вследствие этого имеют нелинейную статическую характеристику. При

использовании плоских мембран в качестве рабочего участка используется обычно небольшая часть возможного ее хода.

Плоские мембраны применяются главным образом в приборах давления специальных конструкций с пьезокварцевыми, емкостными, индуктивными и тензопреобразователями. Приборы с плоскими мембранами обладают малой инерционностью и могут быть использованы для измерения переменного давления с частотой его изменения до тысячи герц.

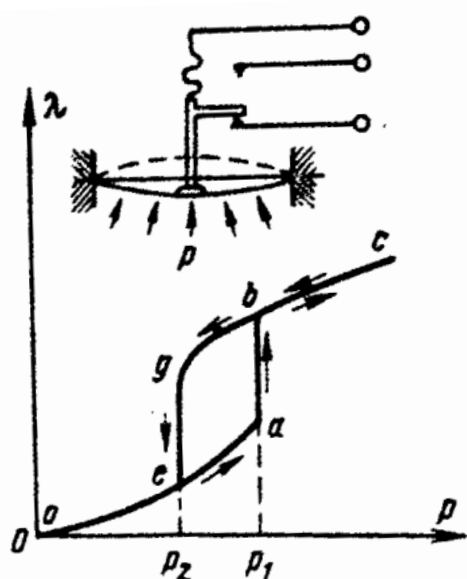


Рис.3.10- Выпуклая мембрана и ее характеристика

Выпуклые мембраны. Выпуклые мембраны, их еще называют «хлопающие», изготавливаются также из стали или бронзы и при измерении давления могут принимать два положения, переходя из одного в другое скачком. За счет таких своих свойств выпуклые мембраны используются в реле давления, в сигнализаторах давления при его отклонении от заданного.

На рис. 3.10 показан принцип работы выпуклой мембраны. При воздействии давления p на мембрану ее прогиб λ на начальном участке (oea) статической характеристики плавно возрастает. После дальнейшего повышения давления мембрана теряет устойчивость, и она меняет скачком свой прогиб (участок ab характеристики), при этом замыкая (размыкая) электрические контакты. Если повышать давление дальше, то прогиб мембраны будет снова плавно возрастать (участок bc характеристики). Если же уменьшать давление от p_1 до p_2 , то мембрана опять скачком возвратится в исходное состояние (участок ge).

Гофрированные мембраны и мембранные коробки. Гофрировка поверхности мембраны в виде кольцевых волн значительно повышает

надежность ее работы и спрямляет статическую характеристику мембраны. Наиболее часто применяемые профили для гофрированных мембран – синусоидальный, трапецеидальный и пильчатый (см. рис. 3.11).

Одиночные гофрированные мембраны в качестве чувствительных элементов применяются довольно таки редко. Наибольшее применение в приборах давления (тягомерах, напоромерах, дифманометрах) получили мембранные коробки, которые представляют собой две спаянные вместе гофрированные мембраны, а также мембранные блоки, состоящие из нескольких мембранных коробок (см. рис. 3.12).

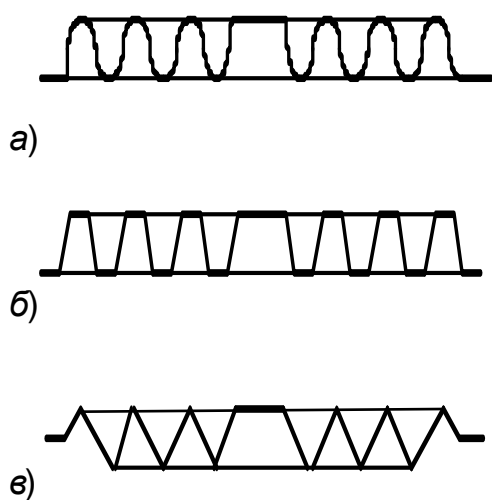
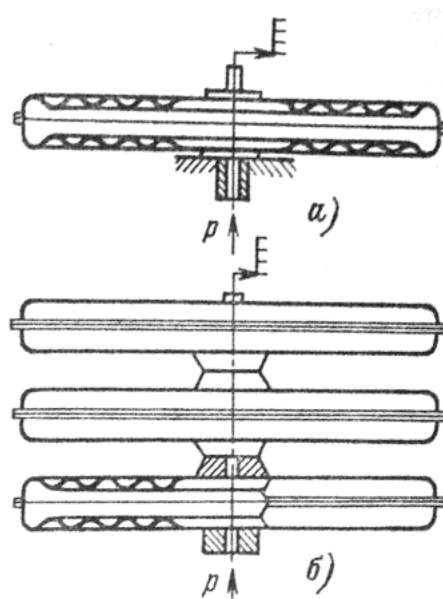


Рис.3.11 - Профили гофрированных мембран:
а- синусоидальный;
б- трапецеидальный;
в- пильчатый.



3.12. - Мембранная коробка и блок
а- мембранная коробка;
б- мембранный блок.
Рис. из трех коробок

Применение мембранных коробок помимо спрямления статической характеристики упругого элемента повышает и его чувствительность.

Для защиты мембранных коробок от возможных перегрузок по давлению применяют специальные упоры, ограничивающие их деформацию.

Увеличение глубины гофров приводит практически к линейной характеристике мембраны за счет большего сопротивления изгибу, а также к повышению жесткости мембраны. Влияние формы профиля на характеристику

мембраны сравнительно невелико, поэтому для воздействия на характеристику изменяют глубину гофрировки или толщину материала. Форму профиля и число волн обычно выбирают из технологических или конструктивных соображений. В тех случаях, когда необходимо уменьшить жесткость на некотором участке характеристики мембраны, ей придают небольшую выпуклость.

Неметаллические мембраны. Кроме металлических мембран в приборах давления, измеряющих малые давления и разности давлений, применяют неметаллические, так называемые «вялые мембраны». Эти мембраны изготавливают из специальной прорезиненной ткани (капрон или шелк, покрытые бензомаслостойкой резиной) или пластмассой.

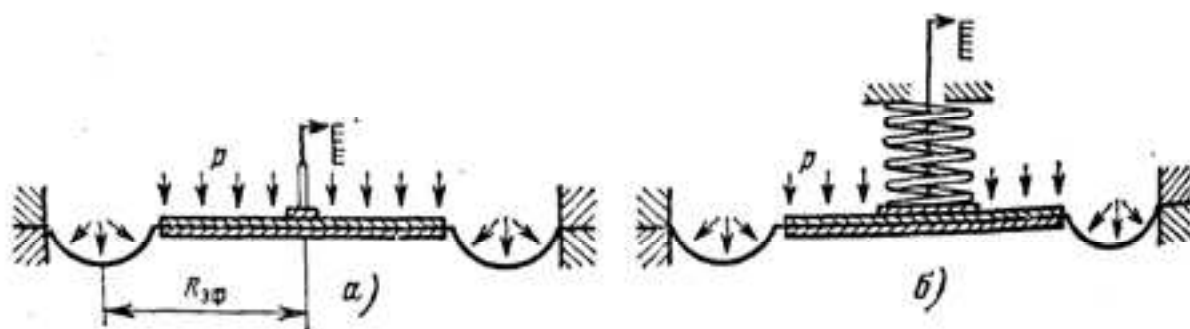


Рис. 3.13 - Неметаллические мембраны с жестким центром:
а- свободная; б- нагруженная пружиной.

Неметаллические мембраны снабжаются жестким центром в виде металлических дисков, диаметр которых обычно составляет примерно 0,8 рабочего диаметра. Для обеспечения постоянства эффективной площади кольцевая часть мембраны выполняется с гофром. Эффективная площадь вялой мембраны определяется в соответствии с выражением: $F_{эф} = \pi \cdot R_{эф}^2$, где $R_{эф}$ - эффективный радиус. В случае, когда жесткости вялой мембраны недостаточно, ее снабжают усиливающей пружиной. На рис. 3.13 приведены вялые мембраны с жестким центром.

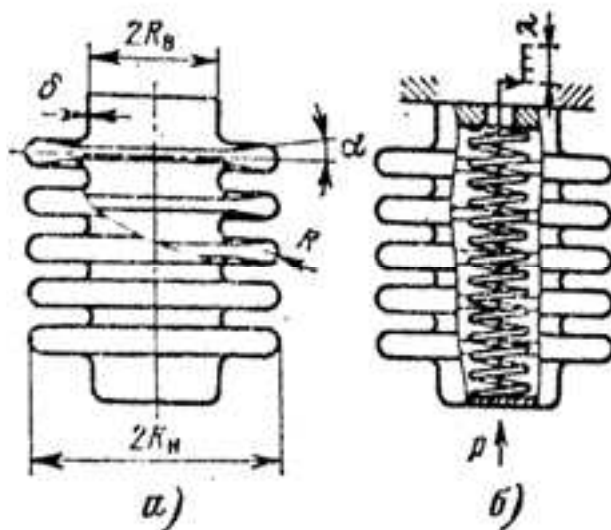


Рис. 3.14 - Сильфоны бесшовные
а- свободный; б- нагруженный.

Сильфоны. Сильфоны применяются в приборах давления (напоромерах, тягомерах и манометрах для измерения небольшого давления 40000 Па) при измерении вакуумметрического давления - до 0,1 МПа, абсолютного давления - 2,5 МПа, избыточного давления - до 60 МПа, разности давлений - до 0,25 МПа. Сильфоны представляют собой тонкостенную трубку с поперечной гофрировкой (см. рис. 3.14) и выдерживают давление на сжатие в 1,5 - 2 раза большее, чем на растяжение, т.е. воздействию давления изнутри.

Жесткость сильфона зависит от его геометрических размеров, толщины стенки трубки, упругих свойств материала трубки, радиуса закругления гофра R и угла уплотнения гофра α . В случаях, когда требуется увеличить жесткость сильфона, он снабжается цилиндрической винтовой пружиной.

Эффективная площадь сильфона с достаточной точностью может быть рассчитана по следующей эмпирической формуле

$$F_{\text{эф}} = \pi \cdot \left(\frac{R_H + R_B}{2} \right)^2, \quad (3.19)$$

где R_H и R_B – соответственно наружный и внутренний радиусы сильфона.

Статическая характеристика сильфонов линейна только для небольших перемещений и обладает высокой стабильностью и чувствительностью. В связи

с этим сильфоны в приборах давления используются в режиме небольших деформаций.

Бесшовные сильфоны изготавливаются путем гофрировки цельных тонкостенных трубок методом механогидравлической опрессовки. На практике применяются также сварные сильфоны, которые изготавливаются путем сваривания листовых штампованных мембран.

Трубчатые пружины. Трубчатые пружины представляют собой изогнутую по дуге трубку с центральным углом γ , равным $200-250^\circ$ эллиптического или плоскоовального сечения. Они называются пружиной Бурдона. Один конец такой пружины закреплен неподвижно, а другой, свободный, закрыт пробкой и запаян. Свободный конец пружины соединен с механизмом показывающего прибора или с другим преобразователем.

Схема пружины Бурдона приведена на рис. 3.15.

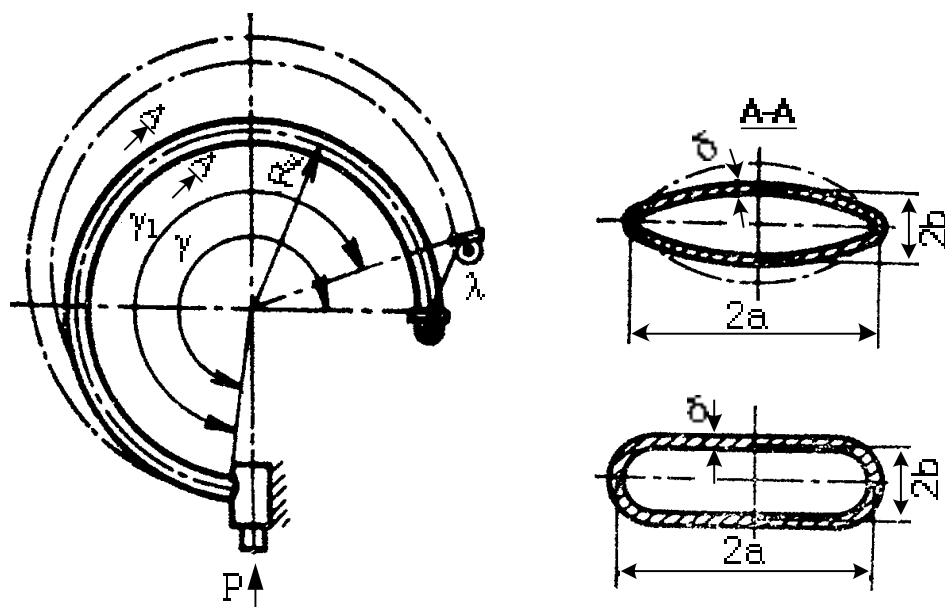


Рис. 3.15 - Одновитковая трубчатая пружина Бурдона различных сечений

Именно такая форма сечения трубчатых пружин позволяет перемещаться ее свободному концу при подведении вовнутрь нее давления. Пружина круглого сечения практически нечувствительна к давлению, т.к. ее поперечное сечение не деформируется при воздействии давления.

Тонкостенные пружины Бурдона применяются для измерения избыточного и абсолютного давления до 6 МПа, а вакуумметрического - до 0,1

МПа. Для измерения больших давлений в диапазоне до 20- 160 МПа применяются толстостенные пружины овального сечения.

Трубчатая пружина тем чувствительнее, чем больше радиус ее кривизны R_k и чем меньше толщина δ . Чувствительность трубчатых пружин с сечениями, приведенными на рис. 3.15, зависит от соотношения осей поперечного сечения a/b .

Относительное изменение центрального угла тонкостенной пружины Бурдона в зависимости от подводимого к ней давления определяется по формуле:

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = p \cdot \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{R_k}{b \cdot \delta} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \cdot \frac{\alpha}{\beta + \chi^2}, \quad (3.20)$$

где $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma$ – изменение центрального угла пружины под давлением;

E – модуль упругости материала пружины;

μ – коэффициент Пуассона;

δ – толщина стенки пружины;

α и β – коэффициенты, зависящие от соотношения a/b , (см. таблицу 3.2);

$\chi = \frac{R_k \cdot \delta}{a^2}$ – «главный параметр» пружины Бурдона.

Полное перемещение λ свободного конца пружины Бурдона будет определяться как геометрическая сумма радиального λ_R и тангенциального перемещений λ_T :

$$\lambda = \sqrt{\lambda_R^2 + \lambda_T^2} = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \cdot R_k \cdot C, \quad (3.21)$$

где

$$\lambda_R = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \cdot R_k (1 - \cos \gamma); \quad \lambda_T = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \cdot R_k (\gamma - \sin \gamma); \quad C = \sqrt{(1 - \cos \gamma)^2 + (\gamma - \sin \gamma)^2}.$$

Подставляя в формулу (3.21) значение относительного изменения центрального угла из формулы (3.20), получим:

$$\lambda = p \cdot \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{R_k^2}{b \cdot \delta} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \cdot \frac{\alpha}{\beta + \chi^2} \cdot C = \frac{p}{K_p}, \quad (3.22)$$

где K_p – жесткость пружины Бурдона по давлению.

Исходя из этого, чувствительность пружины Бурдона по давлению определится следующим образом:

$$S_p = \frac{1}{K_p} = \frac{1-\mu}{E} \cdot \frac{R_K^2}{b \cdot \delta} \cdot \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \cdot \frac{\alpha}{\beta + \chi^2} \cdot C. \quad (3.23)$$

Таблица 3.2 - Значения коэффициентов для расчета трубчатых пружин Бурдона

Форма поперечного сечения	a/b	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10
Эллиптическая	α	0,750	0,636	0,566	0,493	0,452	0,430	0,416	0,400	0,390
	β	0,083	0,062	0,053	0,045	0,044	0,043	0,042	0,042	0,042
Плоскоовальная	α	0,637	0,594	0,548	0,480	0,437	0,408	0,388	0,360	0,343
	β	0,096	0,110	0,115	0,121	0,121	0,121	0,121	0,119	0,118

3.4.2. Приборы давления прямого действия

Приборы давления прямого действия используются для измерения давления в широком диапазоне его изменения – от нескольких миллиметров водяного столба до нескольких тысяч атмосфер. Применяют их как в лабораторных, так и в промышленных условиях. Они отличаются простотой конструкции, небольшими размерами, относительной дешевизной и простотой эксплуатации.

Мембранные напоромеры и тягомеры. Эти приборы, широко применяемые в промышленности, служат для измерения небольших давлений и разрежений, а также незначительных разностей давлений. Например, в котельных установках, промышленных печах и ряде других случаев тягомерами измеряют силу тяги, а напоромерами давление воздуха.

Мембранные тягомеры и напоромеры изготавливают с профильной и концентрической шкалой. При этом их устройство принципиально одинаковое, за исключением отдельных элементов передаточного механизма и формы

корпуса. Приборы с профильной шкалой компактны, и их удобно размещать на щитах.

На рис.3.16 схематически изображен напоромер типа НМП с горизонтальной профильной шкалой, предназначенный для измерения давления, и его внутреннее устройство. В качестве упругого элемента здесь используется мембранная коробка 2, состоящая из двух гофрированных мембран. Подвод давления измеряемой среды осуществляется к трубке 1. При изменении давления среды мембранная коробка прогибается, при этом ее объем либо увеличивается, либо уменьшается. Вследствие прогиба мембранной коробки штифт 3, припаянный в центре верхней мембраны, поворачивает коленчатый рычаг 4, который в свою очередь перемещает указательную стрелку 5 посредством тяги 6 и рычага 7. Для устранения мертвого хода оси стрелки предусмотрен спиральный волосок 12

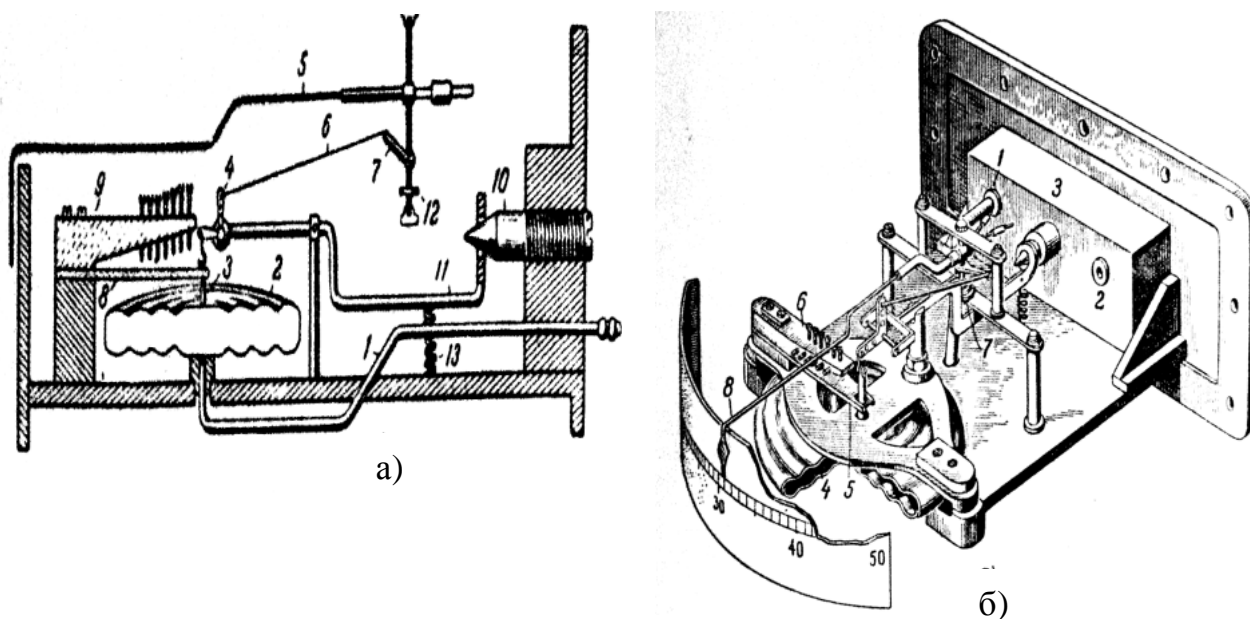


Рис.3.16 - Напоромер типа НМП с горизонтальной профильной шкалой: а- схема устройства; б- внутренний вид: 1-трубка подвода давления; 2- «дыхательное» отверстие; 3- корректор нуля; 4- мембранная коробка; 5- плоская пружина; 6- кронштейн с установочными винтами; 7- спиральная пружина; 8- стрелка.

Ход мембранной коробки непропорционален давлению. Поэтому для получения равномерной шкалы прибора он снабжается специальным

приспособлением, состоящим из плоской пружины 8 и кронштейна 9 с регулировочными винтами. При подъеме пружина опирается на регулировочные винты, вследствие чего с увеличением давления уменьшается рабочая длина пружины, а отсюда увеличивается ее жесткость.

Таким образом, измеряемое давление уравнивается действием упругих сил пружины и мембранной коробки.

Установка стрелки прибора на нулевую отметку шкалы производится винтом 10 (корректором нуля). При вращении его по часовой стрелке конусная часть винта входит в кольцо и поднимает рычаг 11, передвигая стрелку прибора по шкале вправо. При вращении винта против часовой стрелки рычаг 11 под действием пружины 13 опускается и стрелка перемещается влево.

При установке мембранных тягомеров и напоромеров в эксплуатационных условиях необходимо иметь в виду возможные погрешности от изменения температуры среды, окружающей прибор. При повышении температуры показания приборов изменяются, причем эти изменения получаются различными даже для однотипных тягомеров и напоромеров с мембранными коробками, изготовленными из одного материала. По экспериментальным данным, величина температурных коэффициентов приборов этого типа при температурах от 30 до 55 °С колеблется от 0,0007 до 0,0043 на 1 °С.

Мембранные приборы, предназначенные для измерения давления разрежения, выпускают с пределами измерений от 16 до 1600 мм вод. ст. Кроме того, эти приборы изготовляют с нулем посередине шкалы и с пределами измерений от +20 до +500 мм вод. ст.

Прибор с нулем посередине шкалы отличается от прибора, изображенного на рис. 3.16, тем, что имеет еще одну пружину и один кронштейн. Тягомер, так же как и напоромер, имеет одну пружину и один кронштейн, но последний расположен под пружиной. Тягомеры и напоромеры круглые с концентрической шкалой для передачи хода мембранной коробки снабжены рычажно-секторным передаточным механизмом.

Помимо приборов с горизонтальной шкалой, применяются также приборы и с вертикальной профильной шкалой. На рис. 3.17 показана схема такого мембранного тягомера.

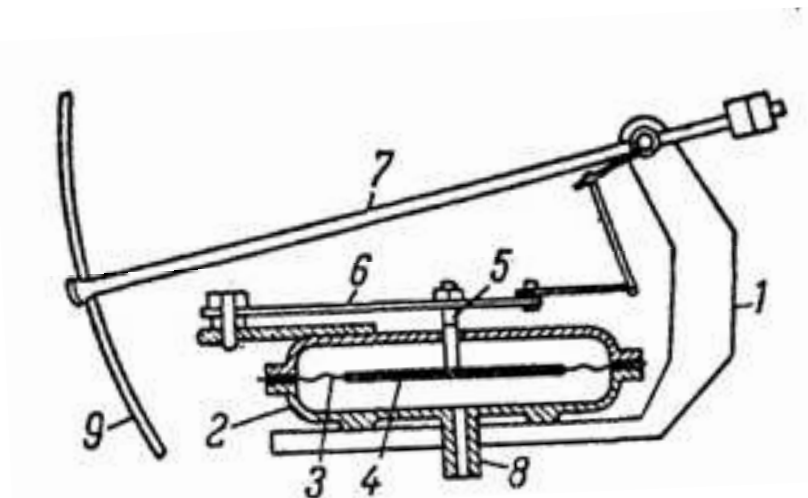


Рис. 3.17 - Мембранный тягомер с вертикальной профильной шкалой

В качестве упругого элемента в этом приборе используется плоская мембрана. На раме 1 закреплена коробка 2, между фланцами которой зажата тканевая мембрана 3. Средняя часть мембраны имеет жесткий центр 4, на котором сверху закреплен штифт 5. Этот штифт упирается в плоскую пружину 6, один конец которой прикреплен к кронштейну коробки. Вторым концом плоской пружины с помощью системы рычагов связан с указательной стрелкой 7. Коробка 2 разделена мембраной на две изолированные полости. Нижняя полость коробки посредством трубки 8 соединяется с местом измерения, а верхняя полость сообщена с атмосферой. Под влиянием разности давлений мембрана будет прогибаться вниз или вверх в зависимости от того, увеличивается или уменьшается измеряемое разрежение. При этом одновременно с мембраной будет прогибаться плоская пружина, которая с помощью передаточного рычажного механизма переместит стрелку вдоль шкалы 9 на угол, зависящий от величины действующего разрежения.

Приборы этого типа изготавливают также в виде напорометров и тягонапорометров, т.е. с нулем посередине шкалы. Тягомеры и напорометры выпускают с пределом измерения от 16 до 2500 мм вод. ст., а тягонапорометры - от +8 до +200 мм вод. ст.

Все типы рассмотренных мембранных приборов с классом точности 1,5 и 2,5. Следовательно, максимальная основная допустимая погрешность их показаний не превышает $\pm 2,5\%$ от верхнего предела измерения.

Манометры, вакуумметры и мановакуумметры. В этих приборах в качестве упругих чувствительных элементов используются сильфоны и одновитковые трубчатые пружины.

Сильфонные приборы применяются для измерения (измерения и записи) вакуумметрических и небольших избыточных давлений, не превышающих 0,4 МПа.

Рассмотрим устройство сильфонных приборов на примере самопишущего манометра типа МСС, схема которого приведена на рис. 3.18.

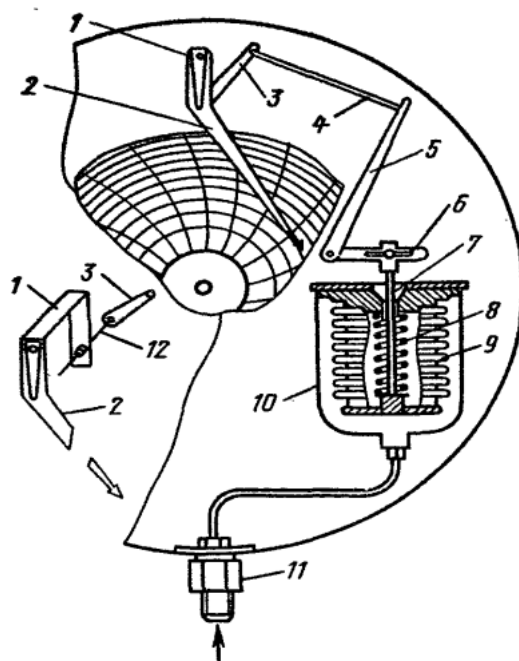


Рис. 3.18 - Самопишущий манометр типа МСС

Сильфон 9 в целях его разгрузки снабжен винтовой пружиной 8, которая вместе с ним создает силу, противодействующую подводимому давлению. Давление среды подводится к штуцеру 11, соединенному трубкой с камерой 10. Под действием давления среды сильфон деформируется, и дно его поднимает шток 7. Шток поворачивает рычаг 6, который посредством рычага 5, тяги 4 и рычага 3 поворачивает ось 12 и сидящий на ней П-образный рычаг 1, на котором расположено перо 2. Запись измеряемого давления производится на дисковой диаграмме. Диаграмма делает один оборот в сутки. Привод

диаграммы осуществляется синхронным электродвигателем или часовым механизмом.

Манометры этого типа выпускаются с верхними пределами измерений от 0,025 до - 0,4 МПа. Показывающие и самопишущие сильфонные манометры выпускаются с классом точности 1,5, сильфонные вакуумметры и мановакуумметры – с классом точности 2,5.

Приборы с одновитковой трубчатой пружиной получили наибольшее распространение и применяются в широком интервале для измерения давления от 1 0,1 до 1000 МПа.

Приборы с одновитковой трубчатой пружиной в зависимости от их назначения разделяются на рабочие и образцовые. Рабочие приборы, в свою очередь, подразделяются на приборы повышенной точности, контрольные и технические. К приборам, предназначенным для измерения с повышенной точностью, относятся манометры типа МТИ и вакуумметры типа ВТИ с классами точности 0,6 и 1, соответственно, а также мановакуумметры типа МТИ класса точности 1. Контрольные показывающие манометры и вакуумметры, предназначенные для поверки технических приборов давления по месту их установки, имеют класс точности 0,5. Технические манометры, вакуумметры и мановакуумметры выпускаются с классами точности 1,0; 1,6; 2,5 и 4. Образцовые же приборы давления выпускаются типов МО (манометры), ВО (вакуумметры) и имеют класс точности 0,16; 0,25; и 0,4. Верхний предел шкалы образцовых манометров типа МО составляет 0,1 – 60 МПа.

В приборах с одновитковой трубчатой пружиной перемещение свободного ее конца передается на стрелку с помощью секторного передаточного механизма. Этот механизм позволяет использовать концентрическую шкалу с углом в 270°.

На рис. 3.19 показана схема устройства показывающего манометра с одновитковой трубчатой пружиной Бурдона и его общий вид.

В соответствии с приведенным рисунком, один конец трубчатой пружины 1 закреплен в держателе 2, скрепленном с корпусом манометра. Внизу держатель снабжен шестигранной головкой и радиальным штуцером 3 с резьбой для присоединения к объекту измерения. Приборы давления

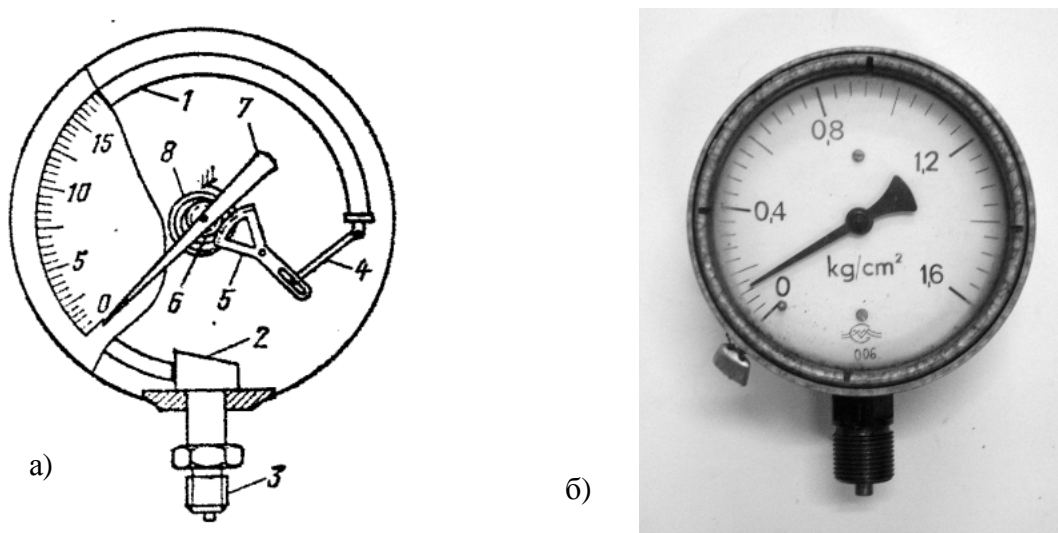


Рис. 3.19 - Манометр с одновитковой трубчатой пружиной:
а- схема устройства; б- общий вид

изготавливаются также с осевым штуцером, располагаемым сзади корпуса прибора. Свободный конец пружины, закрытый пробкой с серьгой, соединен с секторным передаточным механизмом, состоящим из поводка 4, сектора 5 и трибки 6, на оси которой укреплена стрелка 7. Спиральная пружина 8 служит для прижимания зубцов трибки к зубцам сектора, устраняя тем самым мертвый ход.

Под влиянием измеряемого избыточного давления пружина разгибается и тянет за собой поводок, который поворачивает зубчатый сектор и соответственно трибку со стрелкой. Передвигающаяся вдоль шкалы стрелка показывает значение измеряемого избыточного давления. Перемещение свободного конца пружины, а следовательно, и угол поворота стрелки практически пропорциональны измеряемому давлению, поэтому шкала таких приборов равномерна. Регулировка хода стрелки осуществляется изменением длины плеча зубчатого сектора со стороны поводка.

Вакуумметры с одновитковой трубчатой пружиной по своему устройству аналогичны манометру, рассмотренному выше. Если к штуцеру прибора подвести разрежение, то трубчатая пружина будет скручиваться, и ее свободный конец будет перемещаться не вниз. При этом стрелка вакуумметра будет двигаться, в отличие от стрелки манометра, против часовой стрелки. Для

того, чтобы движение стрелки было обычным (по часовой стрелке), конец трубчатой пружины закрепляют с правой стороны держателя.

Мановакуумметры с одновитковой трубчатой пружиной отличаются от манометров шкалой, которая выполняется у них двусторонней. Часть шкалы, расположенная слева от нуля, служит для измерения вакуума в диапазоне от 0,1 до 0 МПа, а справа от нуля - для измерения избыточного давления, с верхними пределами от 0,06 до 2,4 МПа.

Устройство приборов давления с повышенной точностью измерения и образцовых ничем не отличается от обычных приборов с пружиной Бурдона. Высокая точность этих приборов, особенно образцовых, по сравнению с техническими приборами достигается за счет тщательного изготовления и применения материалов высокого качества.

При выборе шкалы прибора с одновитковой трубчатой пружиной необходимо, чтобы рабочий предел измерения избыточного давления был не менее $3/4$ верхнего предела измерения при постоянном давлении и не менее $2/3$ верхнего предела измерения при переменном давлении.

3.4.3. Электроконтактные приборы давления

Электроконтактные приборы давления используются для целей сигнализации отклонения давления от заданной величины, технологической защиты (блокировки) различных аппаратов и агрегатов по давлению, а также в схемах дискретно-импульсного управления при автоматизации технологических процессов. Среди приборов такого типа различают электроконтактные приборы давления (манометры, вакуумметры) типа ЭКМ, а также реле давления типа РД. Электроконтактные приборы давления отличаются от реле давления наличием отсчетного устройства (шкалы) и могут быть использованы одновременно для целей измерения и сигнализации. Реле давления используются только для целей сигнализации и являются «слепыми» приборами.

Электроконтактные приборы давления изготавливаются в виде рассмотренных уже манометров вакуумметров и мановакуумметров. На рис. 3.20 показана принципиальная схема и внешний вид электроконтактного манометра типа ЭКМ.

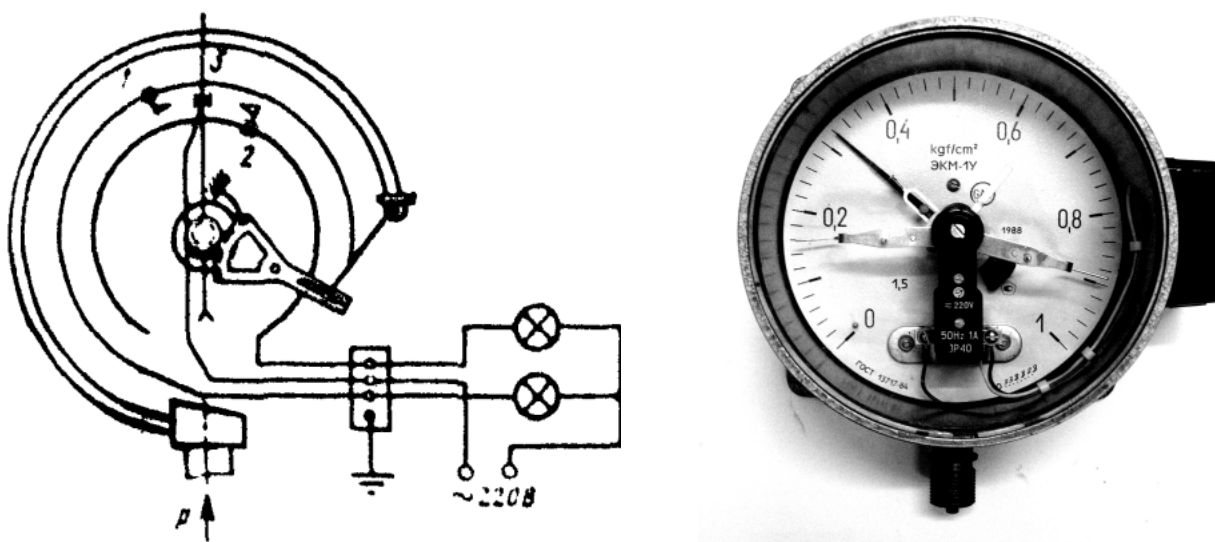


Рис. 3.20 - Электроконтактный манометр типа ЭКМ

В конструкции электроконтактного манометра предусмотрена контактная группа, состоящая из двух переменных контактов 1 и 2 (задающие контакты) и контакта, расположенного на стрелке прибора 3. Контакты прибора монтируют на специальных стрелках, помещенных под стеклом прибора. Установка контактов может быть произведена на любое деление шкалы прибора вращением винта в головке, находящейся на наружной поверхности стекла.

Если давление среды в измеряемом пространстве уменьшится и достигнет того минимального значения шкалы, на которое установлен контакт 1, стрелка замкнет цепь и включит соответствующую лампочку. Если же давление увеличится, то стрелка замкнет контакт 2, т.е. цепь другой лампочки. Вместо световой сигнализации или параллельно с ней может быть применена звуковая сигнализация, либо подключено любое электрическое исполнительное устройство. Для питания схемы контактного манометра можно использовать постоянный (220 в) или переменный (380 в) ток. Разрывная мощность контактов манометра составляет 10 ватт при максимальном токе 1 А.

Электроконтактные манометры ЭКМ выпускаются с верхним пределом измерения от 0,1 до 160 МПа. Мановакуумметры типа ЭКМ выпускаются с верхним пределом измерения вакуумметрического давления до 0,1 МПа, а

избыточного – от 0,1 до 2,5 МПа. Приборы типа ЭКМ имеют класс точности 1,5, 2,5 и 4,0.

Для применения электроконтактных приборов давления во взрывоопасных условиях эксплуатации существуют модификации этих приборов типа ВЭ-16РБ.

Реле давления. Среди реле широкое распространение получили сигнальные реле типа РДС, схема которого представлена на рис. 3.21.

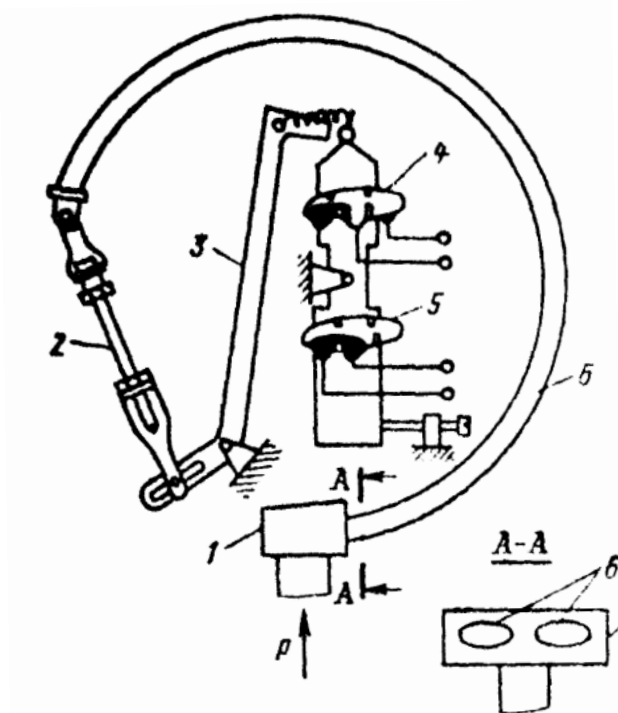


Рис. 3.21 - Реле давления типа РДС

В этом реле в качестве упругого чувствительного элемента используются две одновитковые трубчатые пружины 6, впаянные в общий держатель 1 и подключенные к одному штуцеру. Перемещение свободных концов этих пружин с помощью тяги 2 и рычага 3 передается контактному устройству, состоящему из двух переключателей (нормально замкнутого 5 и нормально разомкнутого 4). Регулировка настройки срабатывания реле осуществляется при помощи тяги и винта.

Диапазон срабатывания реле по давлению составляет от 0,5 до 2,5 МПа с погрешностью $\pm 0,025$ МПа. Разрывная мощность контактов достигает до 300 В·А при токе 1 А.

3.4.4. Приборы давления с преобразователями

Приборы давления с преобразователями, или так называемые первичные приборы давления, получили широкое применение в различных отраслях промышленности для дистанционного измерения избыточного, вакуумметрического и абсолютного давления газа и жидкости, не агрессивных по отношению к сплавам на медной основе и углеродистым сталям. Приборы такого типа особенно необходимы, когда по условиям технологического процесса необходимо централизовать контроль за работой оборудования, находящегося далеко от поста управления.

Первичные приборы давления применяются в комплекте со вторичными приборами и автоматическими регуляторами, а приборы с унифицированным выходным сигналом постоянного тока используются также и с вычислительными машинами при создании автоматизированных систем.

В качестве основных преобразователей в таких приборах давления используются электрические (резистивные и индуктивные), а также пневматические преобразователи.

Принцип действия этих приборов такой же, как и пружинных приборов давления, рассмотренных выше. Отличительной же особенностью является наличие в конструкции прибора соответствующего приспособления для преобразования давления или разрежения в электрический или пневматический сигнал.

Одна из систем электрической дистанционной передачи показаний, использующая резистивный преобразователь, приведена на рис. 3.22.

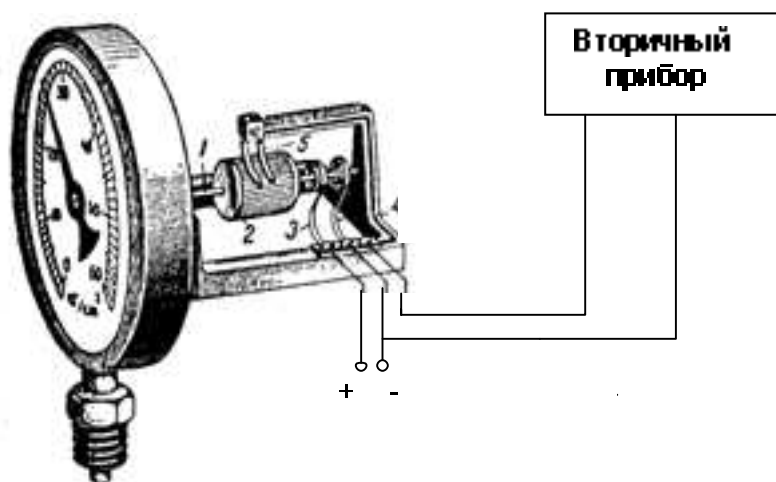


Рис. 3.22 - Манометр с реостатным преобразователем

У данного прибора на оси 1 манометра укреплен датчик 2, представляющий собой реостат, намотанный на цилиндр. В качестве измерительного вторичного прибора может быть использован, например, магнитоэлектрический логометр. Напряжение на реостат подается через пружинные контакты 3 и 4, а сигнал снимается через щетку 5. Показания логометра зависят от соотношения токов, которое определяется соотношением сопротивлений ветвей реостата. Последнее зависит от угла поворота датчика, совпадающего с углом поворота стрелки манометра. Это позволяет проградуировать логометр в единицах давления.

Кроме датчиков этого типа, применяются манометры с индуктивными преобразователями типа МЭД, схема которого приведена на рис. 3.23.

Действие этого прибора основано на использовании деформации одновитковой трубчатой пружины 1, свободный конец которой связан с сердечником 2 дифференциально- трансформаторного преобразователя 3. Изменение положения сердечника вызывает изменение взаимоиндукции между обмотками трансформатора и, следовательно, изменение сигнала на выходе прибора.

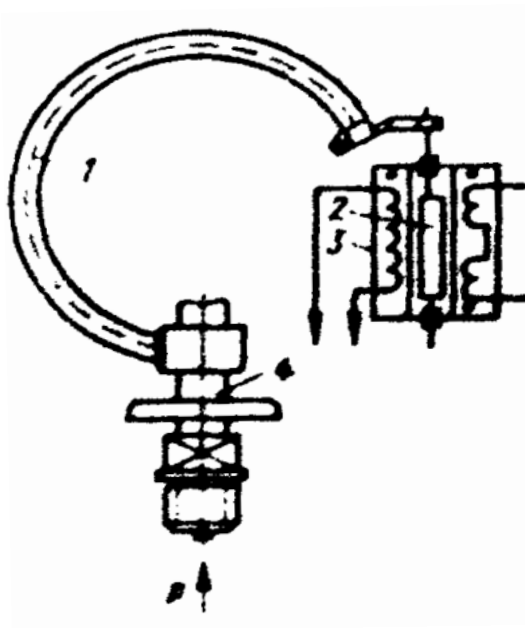


Рис. 3.23 - Прибор давления типа МЭД.

Приборы типа МЭД предназначены для измерения и непрерывного преобразования избыточного или вакуумметрического давления в выходной унифицированный сигнал переменного тока. Они изготавливаются с отсчетными устройствами и без них в следующих модификациях: манометры избыточного давления с верхними пределами измерения от 0,1 до 160 МПа; вакуумметры с пределом 0,1 МПа; мановакуумметры с пределами измерения вакуумметрического давления до 0,1 МПа и избыточного – от 0,06 до 2,4 МПа.

Приборы давления МЭД выпускают с классом точности 1,0 и 1,5. Они могут работать в комплекте со вторичными самопишущими приборами дифференциально-трансформаторной системы типа КСД-1, КСД-2, КСД-3 и другие с нормированным входным сигналом 0 – 10 миллигенри.

В настоящее время находят применение приборы давления, снабженные преобразователями с магнитной компенсацией. Эти приборы предназначены для измерения давления газов или жидкостей. Они изготавливаются без отсчетных устройств в виде следующих первичных измерительных преобразователей давления: манометров абсолютного давления мембранных типа МАДМЭ с верхними пределами измерения абсолютного давления 10 и 60

кПа; манометров мембранных типа ММЭ с верхними пределами измерения избыточного давления от 0,16 до 2,5 МПа; манометров с трубчатой пружиной типа МПЭ с верхними пределами измерения избыточного давления от 2,5 до 60 МПа. В приборах этого типа используется унифицированный передающий линейный преобразователь с магнитной компенсацией.

На рис. 3.24 на примере манометра типа ММЭ показано упрощенное его устройство и структурная схема преобразователя с магнитной компенсацией.

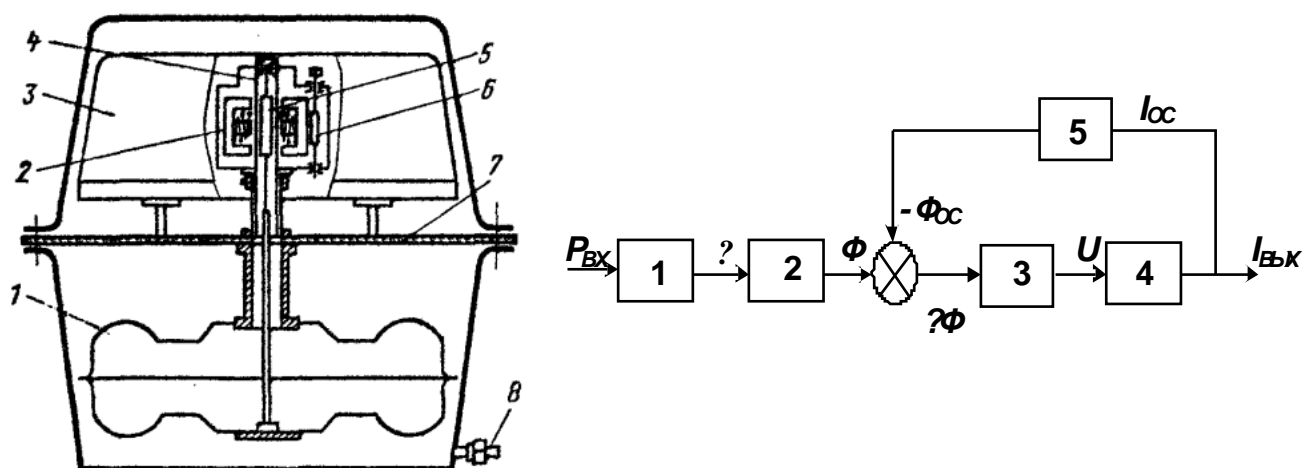


Рис. 3.24 - Манометр типа ММЭ и его структурная схема:

На структурной схеме обозначено: 1- упругий чувствительный элемент; 2- магнитный плунжер; 3- магнитный преобразователь; 4- полупроводниковый усилитель; 5- устройство обратной связи.

Манометр состоит из чувствительного элемента 1, выполненного в виде мембранной коробки, передающего линейного преобразователя с магнитной компенсацией 2 и электронного полупроводникового усилителя 3. На крышке 7 корпуса измерительного блока жестко укреплена разделительная трубка 4 из немагнитной нержавеющей стали. Внутри разделительной трубки находится магнитный плунжер 5, который жестко связан с центром дна мембранной коробки. В приборе предусмотрена возможность перемещения преобразователя относительно магнитного сердечника, что позволяет производить первоначальную настройку нулевого значения выходного сигнала. При эксплуатации манометра регулировка нулевого значения выходного ходкого сигнала производится с помощью корректора нуля 6. Подвод измеряемого

давления осуществляется через резьбовой штуцер 8, который снабжен гайкой и ниппелем.

Измеряемое давление среды P воспринимается мембранной коробкой, которая, деформируясь на величину λ , перемещает магнитный плунжер, вызывающий изменение намагниченности Φ сердечника преобразователя пропорционально изменению давления. При этом возникает сигнал рассогласования $\Delta\Phi$ на входе магнитного преобразователя, который усиливается и поступает в линию дистанционной передачи, а также в устройство обратной связи, создающее компенсирующее воздействие $\Phi_{ос}$ управляющего магнитного потока.

Манометры такого типа имеют класс точности 1,0 и выходной сигнал постоянного тока, изменяющийся в диапазоне 0 – 5 мА.

Первичные приборы давления с магнитной компенсацией могут работать в комплекте с миллиамперметрами, выполненными на базе автоматических потенциометров серии КСУ и КСП и другими измерителями электрических величин. Кроме того, эти приборы могут работать с автоматическими регуляторами и вычислительной техникой, т.к. на выходе у них имеется унифицированный токовый сигнал.

Помимо приборов давления с электрическими преобразователями, в промышленности широко используются приборы с пневматическими преобразователями, которые в основном применяются на взрывоопасных объектах (предприятия газовой, химической промышленности и т.д.). Эти приборы имеют унифицированный пневматический выходной сигнал с диапазоном изменения 0,02 – 0,1 МПа и построены по блочному принципу. В их состав входят пневмосиловой преобразователь, работающий по принципу «сопло-заслонка», пневматический усилитель мощности и измерительные блоки с различными упругими чувствительными элементами.

Приборы давления пневматические выпускаются в виде следующих устройств: тягомеры сильфонные (ТС-П); напоромеры сильфонные (НС-П); тягонапоромеры сильфонные (ТНС-П); вакуумметры сильфонные (ВС-П);

мановакуумметры сильфонные (МВС-П); манометры сильфонные абсолютного давления (МАС-П) и манометры пружинные (МП-П). Все эти приборы имеют те же верхние пределы измерения и классы точности, что и аналогичные им приборы без преобразователей.

Пневматические приборы давления могут работать в комплекте со вторичными показывающими и самопишущими приборами с пневматическим входным сигналом 0,02 – 0,1 МПа, а также со стандартными пневматическими регуляторами.

3.4.5. Приборы давления электрические

Электрические манометры в настоящее время получили достаточно широкое распространение. Эти приборы позволяют точно измерять быстропеременные давления в большом диапазоне его изменения.

В основу принципа работы электрических манометров положены различные физические явления, например, изменение сопротивления проводников при воздействии внешнего давления, возникновение электростатических зарядов при деформации некоторых кристаллов в определенном направлении, изменение электрической емкости, явление индукции и т.д. В состав этих приборов в обязательном порядке входят соответствующие электрические преобразователи с унифицированным токовым выходом.

Пьезоэлектрические манометры. Действие их основано на использовании пьезоэлектрического эффекта, наблюдаемого у ряда кристаллов (кварца, турмалина, сегнетовой соли и др.). Пьезоэлектрические манометры, использующие в качестве чувствительного элемента кристаллы кварца (SiO_2 - двуокись кремния), нашли наибольшее практическое применение по сравнению с индикаторами из других кристаллов благодаря существенным достоинствам кварца, который негигроскопичен, обладает большой механической прочностью, хорошими изоляционными качествами и независимостью пьезоэлектрических свойств от температуры в интервале (20 - 400°C).

У кристалла кварца (см. рис. 3.25) различают следующие оси: одна оптическая, продольно проходящая через кристалл; три электрических, проходящих через ребра нормально к оптической оси; три механических (или нейтральных), которые расположены нормально к граням и вместе с тем к двум предыдущим осям.

Если из кристалла кварца вырезать прямоугольную пластину с гранями, параллельными осям (срез Кюри), и подвергнуть ее сжатию (или растяжению) вдоль электрической оси, то на ее гранях, перпендикулярных этой оси, появятся электростатические заряды, равные по величине и противоположные по знаку. При переходе от сжатия к растяжению и обратно знаки зарядов меняются в соответствии с изменением знака силы, действующей вдоль электрической оси.

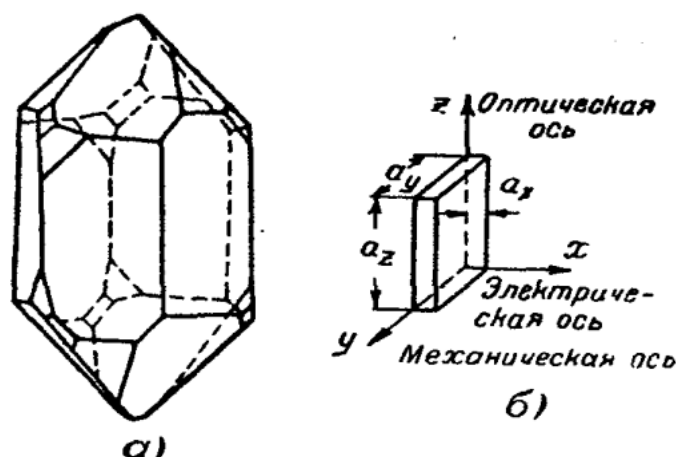


Рис. 3.25 - Кристалл кварца (а); пластина кварца и ее оси (б)

Обозначив через Q_x величину заряда, возникающего при действии силы F_x вдоль электрической оси, а через P_x давление, действующее на площадь грани $S_x = a_y \cdot a_z$, получим:

$$Q_x = K \cdot F_x = K \cdot P_x \cdot S_x, \quad (3.24)$$

где K - пьезоэлектрическая постоянная (пьезоэлектрический модуль).

Пьезоэлектрический модуль не зависит от размеров кристалла, однако его значения различны для разных пород кварца. Величина K для применяемого кварца лежит в пределах от $6,29 \cdot 10^{-8}$ до $6,94 \cdot 10^{-8}$ абсолютных

электростатических единиц (CGSE). Из приведенной формулы следует, что величина заряда Q_x пропорциональна силе F_x .

Если при действующем давлении P_x весь заряд с граней S_x снять, а затем давление P_x изменить до P'_x , то на этих гранях вновь появится заряд Q'_x , равный

$$Q'_x = K \cdot (P'_x - P_x) \cdot S_x \quad (3.25)$$

При действии силы F_y вдоль механической оси заряды появляются также на гранях S_x . При этом знаки зарядов обратны тем, которые появляются при действии силы F_x , имеющей тот же знак, что и сила F_y . Таким образом, растяжение кварца в направлении одной оси равнозначно сжатию его в направлении другой оси. Установлено, что величина заряда Q_y , появляющаяся на гранях S_x в результате действия силы F_y , равна:

$$Q_y = -K \cdot \frac{a_y}{a_x} \cdot F_y. \quad (3.26)$$

Данное уравнение показывает, что увеличение заряда Q_y при одной и той же силе F_y может быть достигнуто путем увеличения размера a_y или уменьшения размера a_x .

Действие силы F_z в направлении оптической оси не вызывает появления заряда.

Пьезоэлектрический эффект называется продольным, если заряд на гранях S_x возникает вследствие действия сил F_x , и поперечным, когда заряды на тех же гранях появляются под действием сил P_y .

Пьезокварцевые манометры, позволяющие измерять давление до 100 МПа и выше, широко применяются при измерении быстропеременных давлений. При этом, чем быстрее протекает исследуемый процесс, тем достовернее данные измерения. Практически пьезоэлектрический эффект можно считать безынерционным и достаточно стабильным.

Устройство датчика пьезокварцевого манометра с продольным пьезоэффектом схематично показано на рис. 3.26.

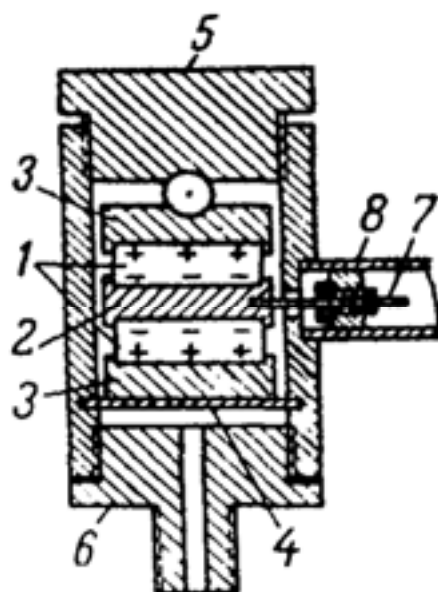


Рис. 3.26 - Схема датчика пьезокварцевого манометра

В корпусе датчика расположены две кварцевые пластины 1, которые обращены друг к другу сторонами одинаковой полярности. Эти стороны кварцевых пластин прилегают к металлической контактной пластине 2. Вторые стороны кварцевых пластин прилегают к металлическим опорам 3 и через них электрически замыкаются на корпус датчика. Металлические опоры вместе со столбиком из кварца зажимаются между металлической мембраной 4 и гайкой 5. Шарик, пребывающий между гайкой 5 и верхней опорой, способствует равномерному распределению давления на поверхности кварца. Нижняя гайка 6 с каналом служит для соединения датчика с объектом измерения. При измерении давления положительный заряд, появляющийся на гранях кварцевых пластин, отводится на корпус, а отрицательный заряд с граней пластин снимается контактной пластиной 2 и с помощью провода 7 подается на измерительное устройство. Диэлектрическая втулка, установленная в канале 5, изолирует провод от корпуса датчика.

Чувствительность датчика обычно повышают путем увеличения активной площади мембраны, применения большего числа последовательно включенных кварцевых пластин или же применением удлиненной кварцевой пластины, работающей с использованием поперечного пьезоэффекта.

Основные трудности измерения давления при помощи пьезодатчиков вызываются тем, что величины зарядов очень малы, поэтому для их измерения пригодны только такие способы, при которых не происходит утечки заряда.

Манометры сопротивления. Принцип действия манометров сопротивления основан на изменении электрического сопротивления первичных преобразователей при действии на них внешнего давления. Среди этих манометров можно выделить две группы приборов - приборы с упругими чувствительными элементами и без них.

В манометрах сопротивления с упругими чувствительными элементами в качестве преобразователя давления используются тензодатчики, закрепляемые на чувствительном элементе. Тензодатчик выполняется из нескольких витков тонкой манганиновой проволоки, уложенной в один слой на плоской поверхности. Деформации чувствительного элемента, вызываемые изменениями давления, изменяют сопротивление тензодатчика за счет растяжения проволоки пропорционально действующему давлению.

В манометрах сопротивления без упругих чувствительных элементов применяются вещества, меняющие свое электрическое сопротивление при непосредственном воздействии на них внешнего давления. К числу таких веществ относятся, например, угольный порошок, платина, константан, манганин и ряд других. На практике отдается предпочтение манганину, т.к. он имеет линейную зависимость электрического сопротивления от давления вплоть до давления в 3000 МПа, а также обладает малым температурным коэффициентом сопротивления. К недостаткам манганина можно отнести малое изменение сопротивления от давления.

Для измерения изменения сопротивления от давления для приборов рассматриваемого типа используются автоматические мосты, а при более точных измерениях - потенциометры. Все манометры сопротивления требуют индивидуальной градуировки.

В настоящее время все больше применяются современные общепромышленные электрические преобразователи давления. Это

интеллектуальные, со встроенным микропроцессором, интегральные преобразователи с цифровым интерфейсом. Они обладают свойствами диагностики и конфигурирования на расстоянии (установка нуля и диапазона шкалы, выбор технических единиц, ввод данных для идентификации и физического описания датчика и т.п.), обеспечивают более высокое соотношение измеряемых диапазонов, улучшенную температурную компенсацию, повышенную точность измерения.

Основные характеристики ряда электрических промышленных измерительных преобразователей давления приведены в таблице 3.3.

Измерительный преобразователь типа «МТ-100», «Сапфир-22МТ», а также микропроцессорный датчик нового поколения «Сапфир-22МП» выпускаются как в обычном, так и во взрывозащищенном исполнении. Датчики выпускаются для ряда стандартных диапазонов измерения. Верхний предел измерения для всех датчиков равен диапазону измерения, а нижний - нулю. Отдельные модели датчика «МТ-100» могут работать со средами, температура которых достигает до 300 °С. Питание датчиков осуществляется от блоков питания по 2-х или 4-х проводной линии. Датчик «Сапфир-22МТ» является аналогом ранее выпускавшегося датчика «Сапфир-22М» и отличается уменьшенной основной и дополнительной температурной погрешностью, а также расширенными пределами перенастройки диапазонов измерения. Датчик «Сапфир-22МП» является аналогом «Сапфир-22МТ», но с использованием микропроцессорной схемы измерения. Выпускаемые преобразователи типа «ИНСАР» используют полупроводниковый первичный преобразователь давления на основе кремниевого мембранного. тензорезистивного элемента и позволяет заменить «Сапфир-22» при измерениях давления воздуха или газов (в том числе и агрессивных).

Таблица 3.3

Характеристика общепромышленных электрических преобразователей давления

Технические характеристики	Модель									
	MT-100	Сифир-22МТ	Сифир-22МП	ИНСАР	Метран-43, -45	Метран-1151 (AlphaLine 1151)	Fisher-Rosemount 2088	Honeywell ST 3000/STD924	Siemens SITRANS P серии MKII, DS, HK	Siemens SITRANS P серия Z
Назначение*	ДИ, ДВ, ДИВ	ДА, ДИ, ДВ, ДИВ, ДД	ДА, ДИ, ДВ, ДИВ, ДД	ДИ, ДД	ДИ, ДВ, ДИВ, ДД	ДА, ДИ, ДД	ДА, ДИ	ДД	ДА, ДИ, ДД	ДА, ДИ
Верхний предел измерения*	ДИ 16 кПа, ..., 100 МПа	ДА 4,0 кПа, ..., 2,5 МПа	ДА 4,0 кПа, ..., 2,5 МПа	4, ..., 250 кПа	ДИ 0,1 кПа, ..., 6,0 МПа	0,5 кПа, ..., 40 МПа	7 кПа, ..., 27,5 МПа	ДД 62, ..., 1000 ибар	30 ибар, ..., 400 бар	1, ..., 400 бар
	ДВ 16, ..., 250 кПа	ДИ 0,25 кПа, ..., 100 МПа	ДИ 0,16 кПа, ..., 100 МПа		ДВ 0,1, ..., 100 кПа					
	ДИВ 8,0 кПа, ..., 3,9 МПа	ДВ 0,4, ..., 100 кПа	ДВ 0,25, ..., 100 кПа		ДИВ 0,08, ..., 530 кПа					
		ДИВ 0,2 кПа, ..., 2,4 МПа	ДИВ 0,125 кПа, ..., 2,4 МПа		ДД 0,1 кПа, ..., 25 МПа					
		ДД 0,25 кПа, ..., 16 МПа	ДД 0,16 кПа, ..., 16 МПа							
Предел основной погрешности, %	±0,25, ±0,5, ±1,0	±0,25, ±0,5, ±0,2, ±0,4, ±0,15, ±0,6	±0,1, ±0,15, ±0,25, ±0,5, ±0,2, ±0,4	±0,5, ±1,0, ±1,5	±0,25, ±0,5, ±1,0	±0,1, ±0,25	±0,2	±0,1, ±0,075	±0,1, ±0,25	±0,25
Диапазон рабочих температур, °C	-30...+50, -10...+80, -50...+80, +5...+50		-30...+50, -40...+80, +5...+50, -10...+80	+5...+50	-42...+70, -42...+50, -30...+50, -10...+50, +5...+50, +5...+70	-40...+93	-40...85	-40...+85	-30...+85 (температура хранения -50...+85°C, температура контролируемой среды -40...+100°C)	-25...+85 (температура хранения -50...+100°C, температура контролируемой среды -30...+120°C)
Выходной сигнал	I=0...5, 4...20 мА			I=0...5, 4...20 мА, U=0...5 В	I=0...5, 4...20, 0...20 мА	I=4...20, 10...50 мА, U=0,8...3,3, 1...5 В, HART-протокол	I=4...20 мА, U=1...5 В, HART-протокол	I=4...20 мА, DE-протокол, HART-протокол, Foundation, Fieldbus (FF)	I=4...20 мА, Hart-протокол, PROFIBUS-PA	I=4...20 мА
Напряжение питания, В	=36 для I=0...5 мА		=36 для 4-проводной линии	=36, 24/50 Вц	=36	=12...45	=10,5...36	=11...42	=11...45	=10...36
	=15...42 для I=4...20 мА		=16...36 для 2-проводной линии			=30...85			=11...30	
Масса, кг	1,0, 1,6	1,0, ..., 12,1	2,0, ..., 12,8	1,5	1, ..., 6,5	5,4	0,9	4,1	1,5	0,25

*) в таблице приняты обозначения такие же, как и на рис. 3.2.

В пьезорезонансном датчике избыточного давления «Кварц-ДИ» в качестве чувствительного элемента используется пьезочувствительный кварцевый резонатор - кристаллический сдвоенный микрокамертон, закрепленный на кварцевой мембране. Здесь измеряемое давление через разделительную мембрану и жидкость передается на кварцевую мембрану, вызывая ее деформацию и меняя резонансную частоту тензорезонатора. Этот прибор отличается малой основной (0,1 - 0,25 %) и дополнительной температурной погрешностью.

Выпускаемый цифровой манометр ДМ 5001 сочетает в себе качества манометра (индикация значения давления на электронном цифровом табло) и датчика с унифицированным токовым выходом.

Преобразователи давления типа «Метран» полностью взаимозаменяемы с рассмотренными выше преобразователями, однако отличительной особенностью прибора «Метран-44» является использование кремнийорганической разделительной жидкости между мембранами, что обеспечивает коррозионную стойкость в химически агрессивных средах.

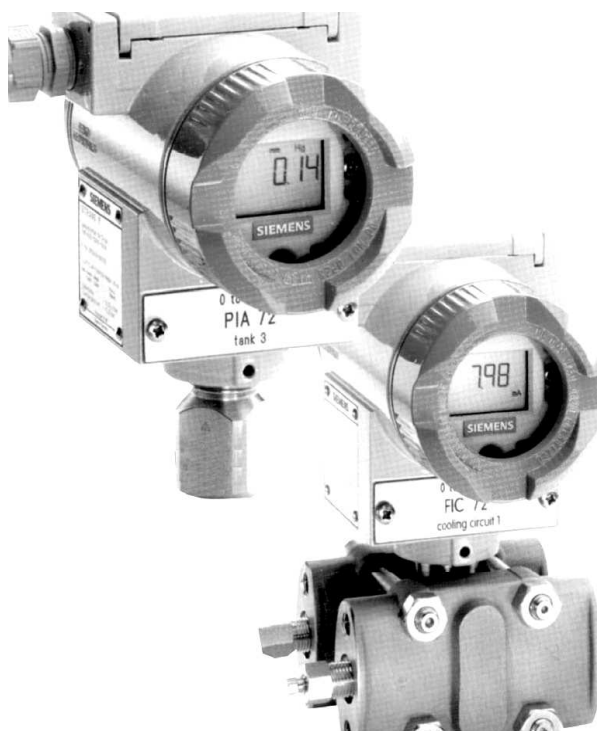


Рис. 3.27 - Интеллектуальные преобразователи давления SITRANS P

Большинство из упомянутых выше преобразователей давления при всех своих достоинствах, определяющих их широкое применение в промышленности, обладают существенными недостатками: низкими интеллектуальными и интерфейсными возможностями. В этих условиях экономически оправданным может оказаться использование преобразователей давления, выпускаемых ведущими мировыми производителями. Например, интеллектуальные датчики SITRANS P фирмы Siemens (см. рис. 3.27), «Alphaline-1151» фирмы Fisher-Rosemount и датчики SMW3000 фирмы Honeywell, а также измерительные линии типа Smartline, ST3000 и Fieldbus. Давление в этих приборах измеряется пьезорезистивными тензодатчиками и осуществляется микропроцессорная обработка результатов, обеспечивающая высокую точность и широкий диапазон измерений, а также их связь по соответствующим протоколам обмена информацией с компьютерными системами верхнего уровня.

3.5. Грузопоршневые манометры

Принцип работы поршневых манометров основан на уравнивании сил, создаваемых, с одной стороны, измеряемым давлением, а с другой - грузами и поршнем, помещенными в цилиндре. О величине измеряемого давления можно судить по величине веса грузов и поршня или по перемещению последнего. Поршневые манометры в зависимости от назначения делятся на образцовые и рабочие.

Образцовые поршневые манометры широко применяют для поверки и градуировки пружинных манометров. В некоторых случаях, например, при проведении научно-исследовательских работ, их используют для выполнения непосредственных измерений давления.

Рабочие поршневые манометры предназначены для измерения давления непосредственно в промышленных условиях, однако представляют собой

слишком сложные и дорогие приборы, поэтому в настоящее время они не применяются.

На рис. 3.28 представлена схема и общий вид поршневого манометра, который является наиболее простым и распространенным из числа образцовых приборов данного типа.

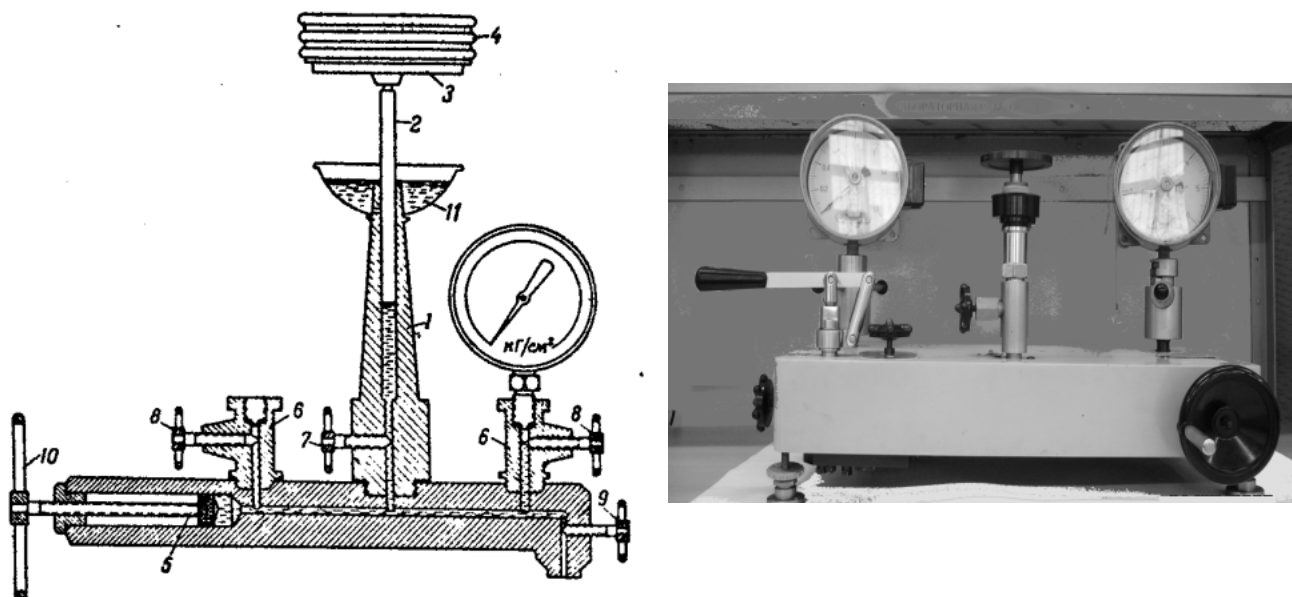


Рис. 3.28 - Схема и внешний вид грузопоршневого манометра

Измерительная часть прибора состоит из колонки 1 с цилиндрическим шлифованным каналом и поршня 2, несущего на верхнем своем конце тарелку 5 для установки грузов 4. Вес грузов обычно подбирают с учетом рабочей площади поршня 2.

Цилиндрический канал колонки сообщается с полостью цилиндра поршня 5 винтового пресса. Кроме того, канал колонки и цилиндр винтового пресса сообщаются с помощью дополнительных каналов со штуцерами 6, служащими для присоединения поверяемых манометров. Колонки и штуцеры снабжены игольчатыми вентилями 7 и 8. Вентиль 9 служит для спуска рабочей жидкости из прибора. В качестве рабочей жидкости обычно применяют вазелиновое, турбинное или трансформаторное масло.

Перед началом работы прибор посредством установочных винтов устанавливают по уровню, имеющемуся на приборе, а затем вынимают

поршень и через воронку 11 заполняют прибор маслом. Поверяемый манометр устанавливают в один из штуцеров и открывают его вентиль. Затем поршень вставляют в канал колонки и на его тарелку кладут необходимое количество грузов. Во время работы прибора необходимо, чтобы поршень был погружен в канал колонки примерно на две трети своей высоты. На таком уровне поршень должен поддерживаться в течение всего времени поверки манометра, что достигается вращением маховика 10. Во время поверки для уменьшения влияния трения поршень приводят во вращательное движение от руки.

Под влиянием веса грузов и поршня в жидкости создается давление, величина которого может быть подсчитана по формуле:

$$P = \frac{G}{F}, \quad (3.27)$$

где P - давление, кгс/см²; G - вес грузов и поршня, кг; F - рабочая площадь поршня, см².

За рабочую или эффективную площадь поршня обычно принимают площадь сечения поршня плюс половина площади кольцевого зазора между поршнем и цилиндрическим каналом колонки.

Из формулы (3.27) вытекает, что создаваемое давление P тем больше, чем больше вес грузов и чем меньше площадь поршня. Однако при выборе рабочей площади необходимо учитывать возможность изгиба поршня во время работы. Поэтому толщина поршня у данного прибора выбрана достаточно большой - 1 см. Максимальное создаваемое давление, на которое рассчитан данный прибор для поверки с помощью грузов, не превышает 25 - 50 кг/см².

Точность поршневого манометра зависит от точности определения рабочей площади поршня и веса грузов. Рабочая площадь поршня с большой точностью может быть определена экспериментально с помощью ртутного манометра при условии введения необходимых поправок или с помощью поршневого манометра большего класса точности. Измерив давление в приборе с помощью ртутного манометра или поршневого манометра и взвесив грузы и поршень, можно, пользуясь формулой (3.27), подсчитать площадь поршня.

Поршень 2 не имеет какого-либо специального уплотнения. Оно достигается тщательной шлифовкой строго цилиндрического поршня к шлифованному каналу колонки таким образом, чтобы зазор между поршнем и цилиндрическим каналом колонки был минимальным. Обычно величина зазора равняется нескольким микронам. При такой величине зазора опускание поршня вследствие неизбежной утечки масла весьма незначительно.

Поршневой манометр рассмотренного типа может быть использован для непосредственной поверки пружинных манометров аналогичными образцовыми пружинными манометрами в диапазоне давлений до 500 кг/см^2 . В этом случае колонка отключается от винтового пресса вентилем 7.

Поршневые манометры описанного типа разделяются на 3 разряда. Приборы 1-го разряда, имеющие класс точности 0,02, предназначаются для поверки поршневых манометров 2-го разряда. Приборы 2-го разряда, имеющие класс точности 0,05, служат для поверки поршневых манометров. Приборы 3-го разряда, имеющие класс точности 0,2, применяются для поверки рабочих пружинных манометров.

3.6. Дифференциальные манометры

Дифференциальные манометры (дифманометры) применяют в различных отраслях промышленности для измерения перепада давления, расхода жидкостей, газов и пара по перепаду давления в сужающих устройствах и уровня жидкости, находящейся под атмосферным, избыточным или вакуумметрическим давлением. Кроме того, некоторые типы дифманометров используются в качестве тягомеров, напорометров и тягонапорометров.

Для технических измерений применяются дифманометры различных типов: колокольные, кольцевые, поплавковые, мембранные и сильфонные. Эти приборы в зависимости от наличия устройства для отсчета показаний, дистанционной передачи информации и рода выходного сигнала (электрический, пневматический и др.) имеют следующие разновидности:

1. Дифманометры с отсчетными устройствами, у которых перемещение чувствительного элемента и подвижных частей, связанных с ним, под действием измеряемой разности давления или давления используется непосредственно для показания или записи.

2. Дифманометры с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированными выходными сигналами переменного тока, применяемые в комплекте со вторичными приборами.

3. Дифманометры с отсчетными устройствами или без них, снабженные передающими преобразователями с унифицированными выходными сигналами постоянного тока или пневматическим сигналом, предназначенные для работы со вторичными показывающими и самопишущими приборами, а также регуляторами и информационно-вычислительными машинами.

Указанные выше дифманометры или вторичные приборы, работающие в комплекте с ними, могут иметь дополнительные устройства для сигнализации, интегрирования и др.

Все производимые дифманометры-расходомеры и дифманометры-перепадомеры подразделяются на приборы с малым и большим предельным перепадом давления, который определен стандартами.

Предельный перепад давлений для приборов с малым его значением соответствует следующему ряду: 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500, 4000, 6300, 10 000, 16 000 и 25 000 Па; а для приборов с большим значением перепада - 0,04; 0,063; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,63; 1,0 и 1,6 МПа.

Верхние пределы измерений дифманометров-перепадомеров должны соответствовать уровню измеряемых перепадов. Верхние же пределы дифманометров-расходомеров для соответствующих предельных номинальных перепадов давления должны выбираться из ряда: (1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8)·10ⁿ м³/час. Здесь n – целое (положительное или отрицательное) число или нуль.

Нижние пределы измерений дифманометров-расходомеров должны составлять не более 30% от верхнего предела их измерений.

Предельно допускаемые рабочие избыточные давления дифманометров зависят от прочности их корпуса и определяются по ГОСТ 18140-77.

Классы точности дифманометров, применяемых в технике, соответствуют: 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 1; 1,5; 2,5 и 4. (Класс точности 4 допускается только для дифманометров с верхними пределами измерений менее 100 Па).

3.6.1. Колокольные дифманометры

Колокольные дифманометры могут использоваться для измерения расхода газов по перепаду давления на сужающих устройствах, а также для измерения малых давлений или разрежений газа и его перепадов.

В основу работы таких дифманометров заложено перемещение свободно плавающего колокола в жидкости под действием измеряемого давления или его перепада. Применяемые колокольные дифманометры в своем составе имеют тонкостенный колокол с большой рабочей площадью, помещенный в трансформаторное масло, который уравнивается упругой силой винтовой пружины. Форма колоколов у дифманометров колокольной системы может быть разнообразной, но в большинстве случаев колокола выполняются цилиндрической формы, ход которых пропорционален измеряемому давлению или его перепаду. Имеются также дифманометры с колоколами, внутренние стенки которых имеют профилированную форму, ход этих колоколов пропорционален квадратному корню из значения измеряемого перепада давления, и такие колокола применяются в дифманометрах-расходомерах для линеаризации статической характеристики. В настоящее время профилированные колокола в дифманометрах не применяют ввиду сложности их изготовления, а линеаризацию статической характеристики осуществляют во вторичных приборах или преобразователях.

На рис. 3.28 приведена схема колокольного дифманометра типа ДКО. У этого прибора колокол 3, подвешенный на постоянно растянутой пружине 5, частично погружен в разделительную жидкость (трансформаторное масло),

налитую в сосуд 4. Жидкость, находящаяся в приборе, разделяет плюсовую камеру (под колоколом) от минусовой (над колоколом). В нижней части

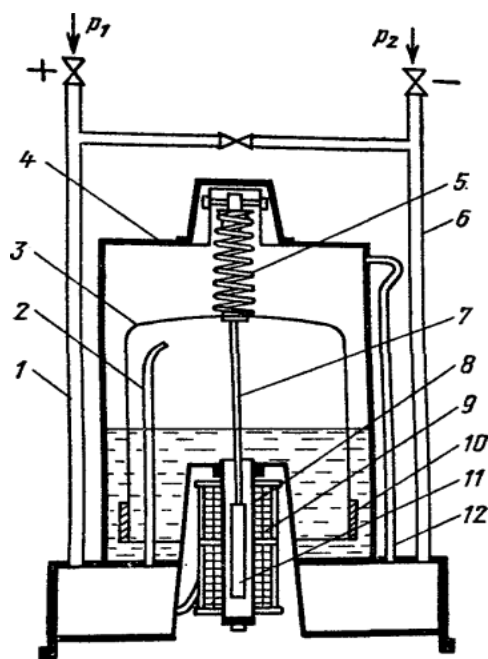


Рис. 3.29 - Схема колокольного дифманометра типа ДКО

колокола прикреплен кольцевой груз 10, который при любых перемещениях колокола должен оставаться погруженным в масло. Дифманометр снабжен дифференциально-трансформаторным преобразователем 9, который закреплен на разделительной трубке 8. Внутри разделительной трубки находится сердечник 11, жестко связанный с колоколом при помощи стержня 7, выполненного из немагнитной стали.

Дифманометр имеет два запорных вентили для включения и выключения

прибора и один уравнивающий вентиль.

При работе прибора большее (или избыточное) давление p_1 подается через вентиль «+» и трубку 1 в запасную камеру, а затем по трубке 2 - в пространство под колоколом. Меньшее (или вакуумметрическое) давление p_2 через вентиль «-» и трубку 6 поступает во вторую запасную камеру и через трубку 12 подается в пространство над колоколом. Под действием измеряемой разности давлений $p_1 - p_2$ колокол и жестко связанный с ним сердечник дифференциально-трансформаторного преобразователя перемещаются до тех пор, пока усилие от приложенной к колоколу разности давлений не уравнивается упругими силами винтовой пружины. Перемещение сердечника меняет взаимную индуктивность между первичной и вторичной цепями преобразователя и приводит к изменению выходного сигнала.

В случае превышения предельного номинального значения перепада давления повреждения дифманометра не произойдет, т.к. разделительная жидкость будет частично сбрасываться в запасные камеры.

При работе колокольного дифманометра уровень разделительной жидкости и показания прибора будут находиться на нулевой отметке до тех пор, пока подводимые давления в обе камеры дифманометра будут равны. В этом случае сила, действующая на колокол, равная разности между силами тяжести колокола и гидростатического давления, будет уравновешена силой упругости пружины:

$$K_{\Pi} \cdot L = G_K - L \cdot f \cdot \rho \cdot g, \quad (3.28)$$

где K_{Π} – жесткость пружины, Н·м⁻¹;

L – длина начального растяжения пружины, м;

f – площадь поперечного сечения стенок колокола, м²;

G_K – сила тяжести (вес) колокола, Н;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Для дифманометров с тонкостенным колоколом гидростатическим давлением в уравнении (3.28) можно пренебречь, т.к. в этом случае $f \approx 0$, тогда можно записать

$$K_{\Pi} \cdot L = G_K. \quad (3.29)$$

При возникновении разности давлений $p_1 - p_2 > 0$ равновесие сил, приложенных к колоколу, нарушается. При этом появляется подъемная сила от перепада давления, направленная вверх, которая будет перемещать колокол в том же направлении. Это в свою очередь вызовет возникновение противодействующей силы, обусловленной изменением упругих сил пружины вследствие ее деформации. Когда подъемная сила станет равной противодействующей силе, то колокол, переместившись на высоту h , займет новое положение равновесия.

Уравнение, определяющее новое состояние равновесия колокола при подведенной разности давления, имеет вид:

$$(p_1 - p_2) \cdot F_B = G_K - K_{\Pi} \cdot (L - h), \quad (3.30)$$

где F_B – внутренняя поверхность колокола, м².

или с учетом уравнения (3.29)

$$h = \frac{F_B}{K_{II}} \cdot (p_1 - p_2) . \quad (3.31)$$

Из этого уравнения следует, что для приборов с тонкостенным колоколом значение h не зависит от плотности разделительной жидкости, но ее плотность определяет максимальный перепад давления, который может быть измерен данным прибором.

Колокольные дифманометры типа ДКО выпускаются с верхними пределами измерений, соответствующими предельным номинальным перепадам давления, лежащих в интервале от 100 до 1000 Па. Предельно допускаемое рабочее избыточное давление этих дифманометров составляет 0,25 МПа. Эти дифманометры имеют класс точности 1,0. Если же дифманометр отградуирован вместе с вторичным прибором, то пределы допускаемой основной погрешности показаний не должны превышать $\pm 1,5\%$ нормирующего значения измеряемой величины.

Колокольные дифманометры позволяют измерять расход газа в комплекте с вторичным прибором, снабженным квадратичным кулачком, и сужающим устройством при малых перепадах давления. Эти дифманометры используются также в качестве тягомеров, напорометров и тягонапорометров и работают в комплекте с вторичными приборами дифференциально-трансформаторной системы КСД-2 и КСД-3 с нормированным индуктивным выходом 0 – 10 миллигенри.

3.6.2. Дифманометры кольцевые

Кольцевые дифманометры применяются для измерения расхода газа по перепаду давления на сужающих устройствах. Эти дифманометры могут быть использованы также для измерения малых вакуумметрических и избыточных давлений газа.

Конструкция кольцевого дифманометра представляет собой замкнутое полое кольцо, разделенное сверху непроницаемой перегородкой, а в нижней части заполненное разделительной жидкостью (водой или трансформаторным маслом), уровень которой образует центральный угол α . Под действием

давлений, подводимых в плюсовую и минусовую камеры дифманометра, кольцо может поворачиваться на угол φ , достигающий 50° около оси, перпендикулярной плоскости окружности. Осью кольца является опорная призма, расположенная в центре кольца и опирающаяся на стальную подушку. К нижней части кольца прикреплен груз G , который создает противодействующий момент и определяет максимальное значение угла поворота кольца при заданном верхнем пределе измерения разности давлений.

Упрощенная схема кольцевого дифманометра показана на рис. 3.30.

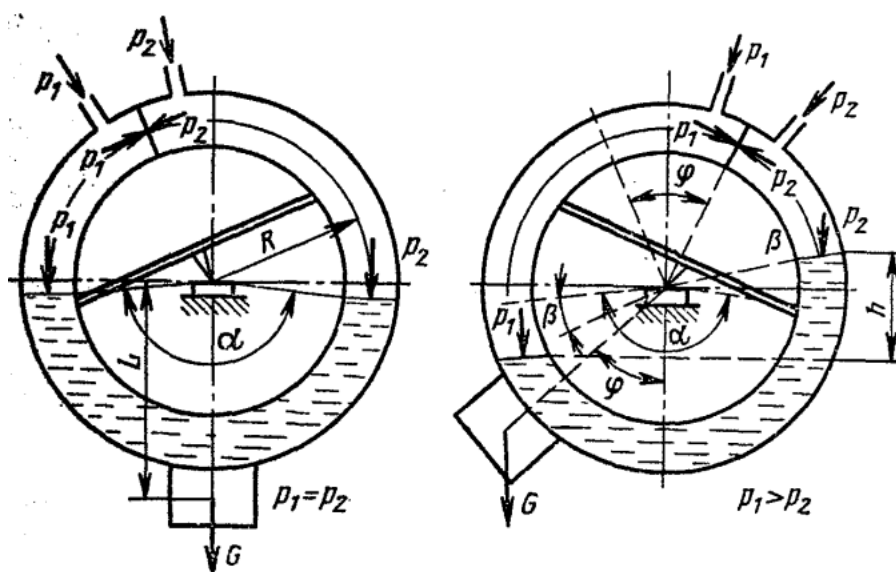


Рис. 3.30 - Схема кольцевого дифманометра

Давления p_1 и p_2 к обеим полостям кольца, образованным перегородкой и разделительной жидкостью, подводятся с помощью гибких резиновых трубок, которые не оказывают существенного влияния на угол поворота кольца. Подвижная система дифманометра до заполнения кольца разделительной жидкостью и снятием груза G балансируется при помощи специальных балансировочных грузов так, чтобы центр тяжести подвижной системы совпадал с осью вращения (балансирующие грузы на схеме не показаны).

Кольцо дифманометра будет находиться в равновесии до тех пор, пока в обеих его полостях давление одинаково. Если p_1 будет больше p_2 , то под

действием разности давлений независимо от движения кольца разделительная жидкость в нем переместится на угол β и, таким образом, действующая на жидкость разность давлений будет уравниваться столбом жидкости h , т.е. $\Delta p = (\rho - \rho_c) \cdot g \cdot h$, где ρ и ρ_c - плотности разделительной жидкости и измеряемой среды, соответственно. При этом действующая на перегородку кольцевой трубки разность давлений $\Delta p = (p_1 - p_2)$ создает движущую силу F , которая, будучи приложенной на расстоянии R от оси вращения кольца, вызовет вращающий момент $M_g = F \cdot R$. Благодаря этому моменту кольцевая трубка повернется на угол φ .

Противодействующий момент M_n создается силой тяжести груза и определяется уравнением

$$M_n = G \cdot L \cdot \sin \varphi . \quad (3.32)$$

Для равновесия кольца необходимо равенство моментов $M_g = M_n$. Отсюда получаем уравнение, выражающее зависимость угла поворота кольца от измеряемой разности давлений:

$$\sin \varphi = \frac{\Delta p \cdot S \cdot R}{G \cdot L} , \quad (3.33)$$

где S – площадь поперечного сечения кольца, L – расстояние от оси вращения кольца до центра тяжести груза G .

Из данного уравнения следует, что угол поворота кольца зависит от размеров кольца: чем больше S и R , тем больше угол поворота кольца. При постоянных значениях Δp , R , S и L угол поворота кольца зависит от силы тяжести груза G : чем меньше сила тяжести груза, тем больше угол поворота кольца. Изменение верхнего предела измерения разности давлений осуществляется в ряде случаев путем изменения силы тяжести груза G , и для этого груз делают составным из отдельных пластин. Верхний предел измерения кольцевого дифманометра можно также менять изменением значения L .

Из этого же уравнения следует, что угол поворота кольца дифманометра не зависит от плотности разделительной жидкости, хотя ее плотность при

заданных размерах кольца определяет верхний предел измерения.

Из уравнения (3.33) следует, что измеряемый перепад давления можно определить по следующему выражению:

$$\Delta p = \frac{G \cdot L}{S \cdot R} \cdot \sin \varphi . \quad (3.34)$$

Это говорит о том, что шкала кольцевого дифманометра, градуированная в единицах давлений, будет неравномерной. Для получения же равномерной шкалы прибора в передаточный механизм отсчетного устройства и преобразователя вводят лекальные пластины нужного профиля. При этом профиль лекала прибора со шкалой, градуированной в единицах давления, будет отличаться от профиля лекала дифманометра, предназначенного для измерения расхода газа по перепаду давления в сужающем устройстве. Профиль лекала дифманометров-расходомеров выполняется так, чтобы прибор показывал квадратичную зависимость от перепада давления. В этом случае шкала прибора получается равномерной.

Кольцевые дифманометры изготавливаются с отсчетными устройствами или без них и снабжаются одним или двумя передающими ферродинамическими преобразователями и могут быть использованы для работы в комплекте со вторичными приборами ферродинамической системы.

Промышленные кольцевые дифманометры типа ДК-Ф выпускаются со стальным кольцом и резиновыми подводными трубками, рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление не более 0,025 МПа и с предельными номинальными перепадами давления 400, 630, 1000 и 1600 Па.

Дифманометры типа ДК-Ф выпускаются также в качестве тягомеров, напорометров и тягонапорометров, имеющие те же верхние пределы измерения, что и дифманометры-расходомеры.

3.6.3. Поплавковые дифманометры

Поплавковые дифманометры работают по тому же принципу, что и жидкостные чашечные приборы давления, рассмотренные выше. Сосуды поплавковых дифманометров располагаются U-образно. У дифманометров

этого типа измеряемый перепад давления уравнивается давлением столба рабочей жидкости (ртути или трансформаторного масла), залитой в прибор. Измерение высоты этого столба осуществляется с помощью поплавка, передающего положение уровня рабочей жидкости в одном из сосудов на отсчетное устройство. Передача хода от поплавка к отсчетному устройству может быть осуществлена механическим путем или с помощью электрического преобразователя на вторичный показывающий (самопишущий) прибор.

Поплавковые дифманометры с ртутным заполнением предназначены для измерения: расхода жидкости, газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве; перепада давления жидкости и газообразных сред; уровня жидкости, находящейся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением.

Схема поплавкового дифманометра приведена на рис. 3.31.

В этом приборе большее давление p_1 подается в широкий (плюсовой) сосуд, а меньшее p_2 действует на поверхность рабочей жидкости другого узкого (минусового) сосуда, который может быть сменен. Для получения необходимого перестановочного усилия диаметр поплавка должен иметь достаточные размеры. Диаметр поплавка в свою очередь определяет оптимальные размеры площади поперечного сечения сосуда, в котором он находится. Размеры минусового сосуда (диаметр и высота) обычно выбираются в зависимости от измеряемого перепада давления. Это дает возможность менять верхние пределы измерения в диапазоне от 6,3 до 100 кПа.

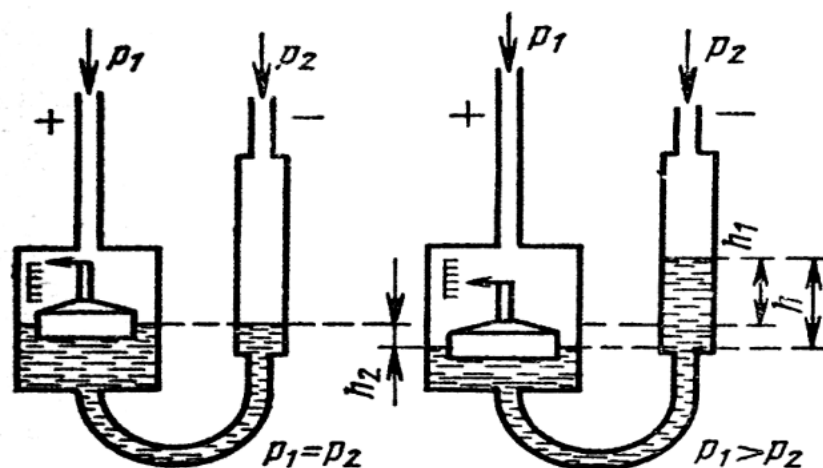


Рис. 3.31 - схема поплавкового дифманометра

В поплавковом дифманометре рабочая жидкость под действием измеряемого перепада давления поднимается на высоту h_1 в сменном сосуде, а в плюсовом же сосуде опускается на высоту h_2 . При этом разность уровней, получаемая от измеряемого перепада давления, определится как $h = h_1 + h_2$.

Уравнение равновесия рабочей жидкости в дифманометре имеет вид:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho - \rho_{\text{в}}) \cdot g \cdot h, \quad (3.35)$$

где ρ , $\rho_{\text{в}}$ - плотность рабочей жидкости и вещества, находящегося над ней, соответственно.

Если обозначить площадь сечения большого сосуда через F , а маленького через f , то в силу равенства вытесняемых объемов рабочей жидкости в обоих сосудах $h_1 f = h_2 F$, получаем:

$$h_1 = h_2 \cdot \frac{F}{f} = h_2 \cdot \frac{D^2}{d^2}. \quad (3.36)$$

Тогда общий перепад уровней в сосудах дифманометра составит:

$$h = h_2 \left(1 + \frac{D^2}{d^2}\right). \quad (3.37)$$

Подставляя (3.37) в уравнение (3.35), получим:

$$\Delta p = h_2 \cdot g \cdot (\rho - \rho_{\text{в}}) \cdot \left(1 + \frac{D^2}{d^2}\right). \quad (3.38)$$

Среди промышленных поплавковых дифманометров рассмотрим два типа – с отсчетным устройством и без него. На рис. 3.32 приведена схема устройства поплавкового дифманометра-расходомера типа ДП-710Р с ртутным заполнением. Этот прибор состоит из плюсового 4 и минусового сменного 12 сосудов.

Движение поплавка 3, находящегося в большом сосуде, передается рычажно-секторному механизму 5 и 7, преобразующему линейное перемещение поплавка в угловое перемещение шестерни 6. Связь этого механизма, находящегося в сосуде 4 под рабочим давлением с отсчетным устройством, расположенным в корпусе прибора 1 под атмосферным давлением, осуществляется с помощью шестерни 6 магнитной муфты (рис. 3.32-б).

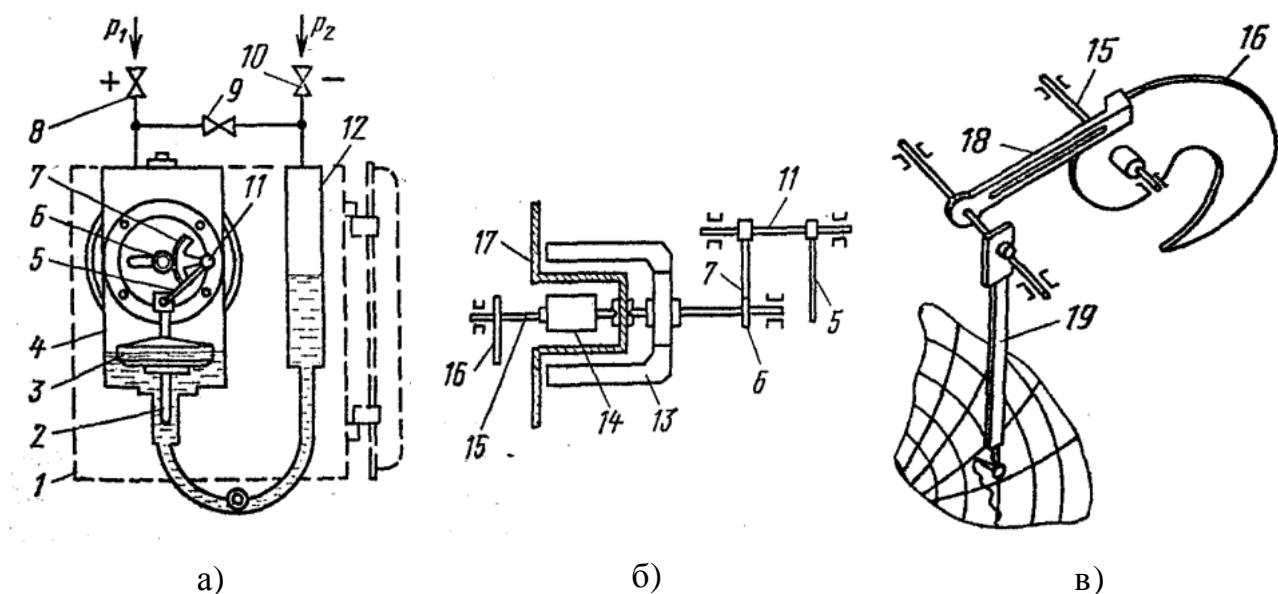


Рис. 3.32 - Поплавковый дифманометр типа ДП-710Р

Магнитная муфта состоит из ведущего магнитопровода П-образной формы 13, ведомого ромбовидного постоянного магнита 14 и разделяющего их стакана 17, выполненного из немагнитного материала. Магнитопровод 13 имеет общую ось с шестерней 6, находящейся в зацеплении с сектором 7, сидящем на оси 11. Ось 11 является одновременно и осью рычага 5, связанного с поплавком. На оси 15, являющейся одновременно и осью ведомого ромбового магнита, закреплено лекало 16, профиль которого рассчитан по квадратичной зависимости.

Самопишущий механизм прибора показан на рис. 3.32-в. Здесь по профилю лекала 16, вращающегося на оси 15 магнитной муфты, скользит щуп 18, на оси которого находится перо 19 для непрерывной записи показаний прибора на диаграммной бумаге. Привод диаграммы осуществляется от синхронного электродвигателя или от часового механизма. На оси щупа может быть закреплен кривошип, который соединяют с рычагом интегратора. Этот кривошип используется также для передачи угла поворота щупа к отсчетному устройству показывающего дифманометра.

Дифманометр снабжен предохранительным клапаном 2 (рис. 3.35-а), который исключает возможность выброса ртути из прибора при одностороннем плюсовом давлении. Прибор включается в работу с помощью вентиля 8 и 10,

которые имеют устройство для продувки соединительных линий. Для выравнивания давления в сосудах при пуске прибора или поверке его на нуль служит уравнительный вентиль 9.

Дифманометры, предназначенные для измерения разности давлений и уровня жидкости, лекалом не снабжаются. У этих приборов на ось 15 магнитной муфты насаживается шестерня, которая с помощью зубчатого сектора и четырехзвенника соединяется с держателем пера.

Некоторые модификации поплавковых дифманометров могут быть снабжены сигнальным устройством, интегратором или пневматическим преобразователем с унифицированным пневматическим выходным сигналом.

Рассмотренный дифманометр типа ДП-710Р рассчитан на предельное допускаемое рабочее избыточное давление 25 МПа. Дифманометры-расходомеры, применяемые для измерения расхода, имеют класс точности 1,0 и 1,5. Дифманометры типа ДП-710Р рассчитаны на следующие номинальные перепады давления, устанавливаемые путем смены семи типоразмеров малого сосуда, указанных в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Номинальные измеряемые перепады дифманометра ДП-710Р

Типоразмер малого сосуда	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Номинальный перепад, кПа	6,3	10	16	25	40	63	100

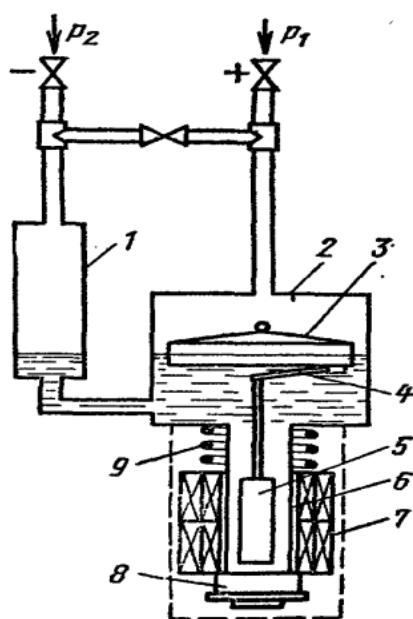


Рис. 3.33 - Поплавковый дифманометр типа ДПЭМ

Дифманометр типа ДПЭМ, схема которого приведена на рис. 3.33, не имеет отсчетного устройства и заполнен маслом.

Дифманометр состоит из сменного 1 и поплавкового 2 сосудов, соединенных U-образно. На дне поплавкового сосуда находится разделительная трубка 6 из немагнитной нержавеющей стали. Снаружи на этой трубке установлен дифференциально-трансформаторный преобразователь 7. К поплавку 3 снизу прикреплена биметаллическая

пластина 4, которая жестко связана с сердечником 5. Биметаллическая пластина позволяет уменьшить температурную погрешность прибора. Дифференциально-трансформаторный преобразователь с помощью пружины 9 прижат к гайке 8, позволяющей перемещать преобразователь вдоль разделительной трубки в тех случаях, когда необходимо изменить его положение относительно сердечника (первоначальная установка нуля). Однако при эксплуатации дифманометра корректировка нуля производится корректором нуля во вторичном приборе.

Дифманометры ДПЭМ выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 400 до 4000 Па. Эти дифманометры имеют класс точности 1,0. Если дифманометр отградуирован вместе с вторичным прибором, то комплекту присваивается класс точности 1,5. Дифманометры ДПЭМ рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление до 0,25 Мпа. Они применяются для измерения расхода газа по перепаду давления в сужающем устройстве, разности давлений, разрежения (тяги) и небольшого избыточного давления (напора). Дифманометры ДПЭМ работают в комплекте со вторичным прибором дифференциально-трансформаторной системы, например, типа КСД.

3.6.4. Дифманометры с упругими чувствительными элементами

Дифференциальные манометры, рассмотренные выше, с жидкостным заполнением, несмотря на свои достоинства (высокая точность, большой срок службы и т.д.) имеют существенные недостатки, обусловленные использованием в них разделительной жидкости, которая в процессе эксплуатации может быть выброшена из-за односторонней перегрузки дифманометра. Это особенно недопустимо для дифманометров с ртутным заполнением. Кроме того, этим приборам присущи и такие недостатки, как большое запаздывание, малые рабочие диапазоны измерения перепада давления и небольшая рабочая частота. Эти указанные основные недостатки вызвали предпосылки разработки и широкого применения во многих областях

техники и промышленности дифференциальных манометров с упругими чувствительными элементами.

В качестве упругих чувствительных элементов, применяемых в промышленно-выпускаемых дифманометрах, в настоящее время получили мембранные блоки, неметаллические мембраны с жестким центром, сильфоны и сильфонные блоки.

Дифманометры с мембранными блоками. К числу таких дифманометров относятся «слепые» приборы с дифференциально-трансформаторным выходом типа ДМ и электрическим токовым выходом типа ДМЭ и ДМЭР.

Дифманометры типа ДМ используются в комплекте со вторичными приборами дифференциально-трансформаторной системы типа КСД-1, КСД-2 и КСД-3.

На рис. 3.34 приведена упрощенная схема дифманометра типа ДМ, содержащего две мембранные коробки, гидравлически связанные между собой и заполненные дистиллированной водой.

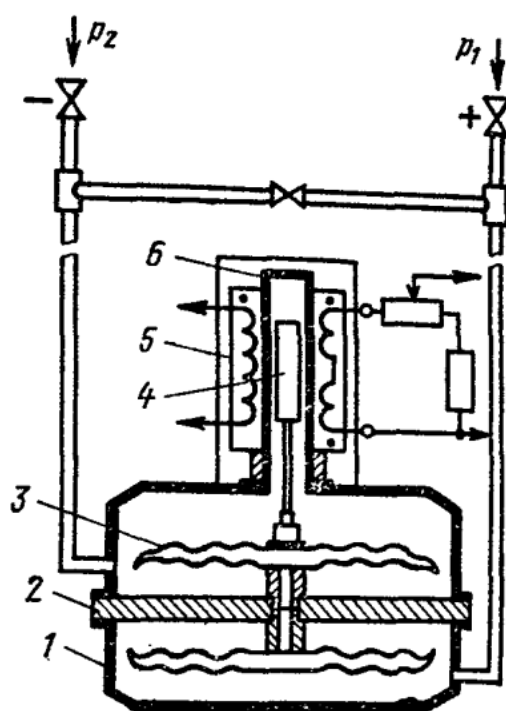


Рис. 3.34 - Дифманометр мембранный типа ДМ

В соответствии с этим рисунком мембранные коробки 1 и 3 закреплены с двух сторон основания 2, которое образует с крышками корпуса две камеры: снизу – «плюсовую»; сверху – «минусовую». Центр мембраны верхней коробки 3 жестко связан с сердечником 4 дифференциального трансформатора 5 при помощи немагнитного стального штока. Подвижный сердечник трансформаторного преобразователя помещен вовнутрь кожуха 6, изготовленного из немагнитной нержавеющей стали. В приборе предусмотрено также устройство,

позволяющее перемещать трансформатор 5 вдоль разделительного кожуха, что дает возможность корректировки нулевого значения выходного сигнала при настройке. Корректировка нуля в промышленных условиях осуществляется во вторичном приборе.

Давления p_4 и p_2 подводятся к камерам дифманометра через два запорных вентиля, обозначенных «+» и «-», соединенных с плюсовой и минусовой камерами дифманометра. Для сообщения этих камер между собой в приборе предусмотрен уравнительный вентиль, расположенный ниже запорных вентилях. Под воздействием разности давлений нижняя мембранная коробка сжимается и жидкость из нее перетекает в верхнюю коробку, вызывая перемещение центра мембраны верхней коробки, а вместе с тем и сердечника дифференциально-трансформаторного преобразователя. Это перемещение приводит к изменению взаимной индуктивности между первичной и вторичной обмотками преобразователя, а следовательно, и к изменению напряжения на его выходе, которое пропорционально измеряемому перепаду давления.

Если фактический перепад давления превышает предельный номинальный перепад давления дифманометра или одна из мембранных коробок находится под воздействием односторонней перегрузки, то повреждения мембранной коробки не произойдет, т.к. она сложится по профилю своих мембран, вытеснив всю жидкость во вторую коробку.

В зависимости от значения предельного номинального перепада давления в дифманометрах типа ДМ устанавливаются мембранные блоки требуемой жесткости.

Дифманометры типа ДМ выпускаются четырех модификаций на предельно допускаемые рабочие избыточные давления 6,3 МПа, 16 МПа, 25 МПа и 63 МПа. Первые три модели приборов выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 1600 до 25 000 Па и от 0,04 до 0,63 МПа. Дифманометры, рассчитанные на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 63 МПа, выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 0,04 до 0,63 МПа. Эти дифманометры имеют классы точности 1,0 и 1,5.

Дифманометры типа ДМ широко применяются в качестве расходомеров в комплекте с сужающими устройствами, перепадаомеров и уровнемеров, причем приборы с номинальными рабочими перепадами давления 1600 и 2500 Па используются только для измерения перепада давления газов.

Дифманометры с выходным сигналом постоянного тока, к которым относятся приборы типа ДМЭ и ДМЭР, используются в комплекте с миллиамперметрами, выполненными на базе автоматических потенциометров КВУ-1, КПУ-1, КСУ-1, КСУ-2 и КСУ-4, а также с регуляторами и другими устройствами автоматизации. Эти приборы имеют унифицированный выходной сигнал 0 -5 мА, пропорциональный перепаду давлений (ДМЭ) и расходу (ДМЭР) и одинаковую конструкцию. Устройство этих дифманометров аналогично рассмотренным дифманометрам типа ДМ, только вместо дифференциального трансформатора у них предусмотрен токовый преобразователь выходного сигнала с магнитной компенсацией.

Дифманометры ДМЭ и ДМЭР рассчитаны на предельное избыточное рабочее давление 40 МПа и выпускаются с предельными номинальными перепадами давления от 4000 до 25000 Па и от 0,04 до 0,63 МПа. Класс точности для ДМЭ соответствует 1,0; а для ДМЭР – 1,5.

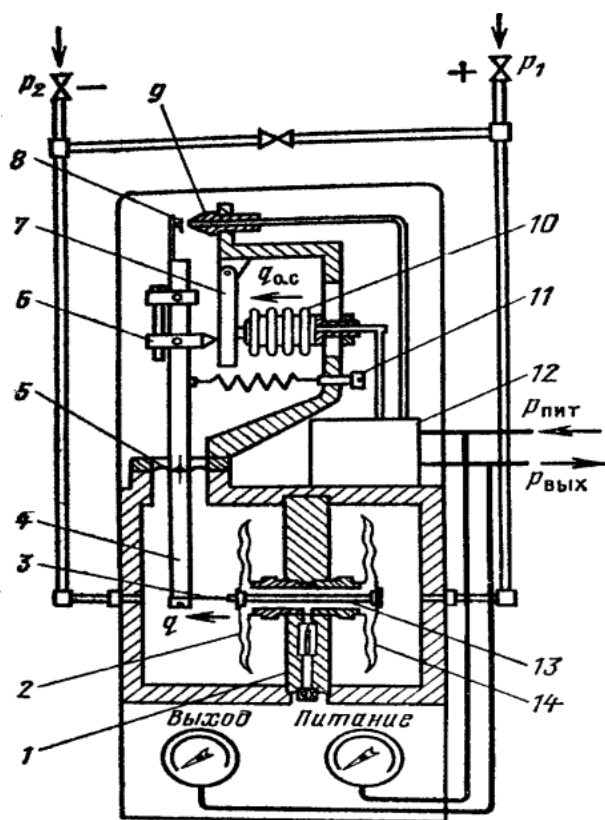


Рис. 3.35 - Дифманометр типа ДМПК

Среди дифманометров, использующих в качестве упругого чувствительного элемента мембранные блоки, различают также приборы типа ДМПК. Эти приборы имеют унифицированный пневматический выходной сигнал 0,02 – 0,1 МПа.

Схема дифманометра типа ДМПК приведена на рис. 3.35.

В основу работы дифманометра заложен принцип компенсации усилия, развиваемого упругим чувствительным элементом, который состоит из двух мембранных коробок 2 и 14,

закрепленных с обеих сторон основания 1, которое делит внутреннюю полость прибора на две камеры. В правую камеру через запорный вентиль «+» подводится давление p_1 , а в левую камеру давление p_2 меньшее, чем p_1 . Внутренние полости мембран гидравлически связаны и заполнены жидкостью – 40% -ым раствором глицерина. Внешние жесткие центры мембран обеих коробок соединены между собой штоком 13. Центр мембранной коробки минусовой камеры связан с основным рычагом 4 пневмосилового линейного преобразователя пластинчатой тягой 3. Вывод основного рычага из минусовой камеры с высоким рабочим давлением уплотнен мембраной 5 из нержавеющей стали, приваренной к рычагу 4 и втулке, закрепленной в корпусе прибора.

Измеряемая разность давлений воздействует на упругий чувствительный элемент и преобразуется в пропорциональное усилие q , которое через рычажную систему 4 и 7 пневмосилового преобразователя уравнивается усилием q_{oc} сильфона обратной связи 10. При изменении измеряемого перепада давления и усилия q происходит небольшой поворот рычажной системы пневмосилового преобразователя и связанной с рычагом 4 заслонки 8 индикатора рассогласования. При этом меняется зазор между заслонкой и соплом 9, вызывая изменение давления сжатого воздуха в линии сопла, которое управляет пневматическим усилителем 12 таким образом, что выходное давление воздуха, поступающее в линию дистанционной передачи и сильфон обратной связи, изменяется пропорционально измеряемому перепаду давления. Мерой измеряемого усилия q , а вместе с тем и перепада давления является текущее значение выходного давления $p_{вых}$, необходимое для создания уравнивающего усилия обратной связи q_{oc} .

Настройка прибора на заданный предельный номинальный перепад давления производится путем изменения передаточного отношения в кинематике пневмосилового преобразователя за счет положения подвижной ножевой опоры 6 и положения сильфона обратной связи. Установка начального нулевого значения выходного сигнала прибора 0,02 МПа производится при помощи пружины корректора нуля 11.

Питание прибора осуществляется очищенным от пыли, влаги и масла воздухом с номинальным избыточным давлением $p_{\text{пит}} = 0,14$ МПа. Для контроля давления питания и выходного давления дифманометр снабжен двумя миниатюрными манометрами.

К промышленно выпускаемым приборам такого типа относятся дифманометры типа ДМПК-100, рассчитанные на рабочее избыточное давление 100 кгс/см^2 (10,0 МПа) с номинальным перепадом давления от 6300 до 25000 Па и от 0,04 до 0,1 МПа.

Дифманометры мембранного типа. В этих дифманометрах используются неметаллические вялые мембраны в качестве упругого чувствительного элемента. К этим приборам относятся дифманометры типа ДМИ, ДМ-Э, ДМ-ЭР и ДМПК-4. Устройство и принцип действия данных приборов практически одинаковый, различаются же они только организацией выходного сигнала.

На рис. 3.36 приведена схема дифманометра ДМИ с дифференциально-трансформаторным преобразователем выходного сигнала.

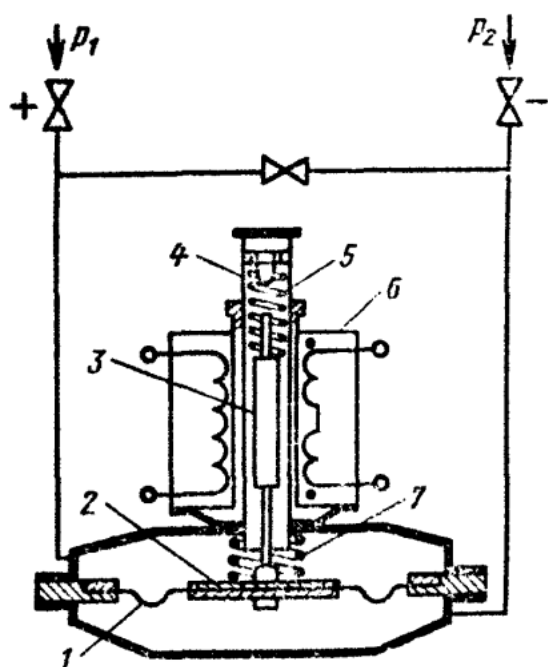


Рис. 3.36 - Дифманометр мембранный типа ДМИ

Эти дифманометры работают в комплекте со вторичными показывающими и самопишущими приборами ВФП или ВФС ферродинамической системы и используются в качестве перепадамеров и расходомеров для измерения расхода жидкости, газа и пара по перепаду давления в сужающем устройстве. Чувствительным элементом прибора является вялая мембрана 1 с жестким центром 2, работающая совместно с винтовой цилиндрической пружиной 5. Мембрана образует две камеры, в которые

подводятся давления p_1 и p_2 . Снаружи дифманометра на разделительной трубке 4, изготовленной из немагнитной нержавеющей стали, размещен дифференциально-трансформаторный преобразователь 6. Между жестким центром мембраны и корпусом установлена дополнительная пружина 7, создающая предварительное натяжение основной измерительной пружины.

Под действием разности давлений жесткий центр мембраны и связанный с ним сердечник 3 трансформатора перемещаются до тех пор, пока сила, вызываемая разностью давлений, не уравнивается силой упругости винтовой пружины. Перемещение сердечника изменяет взаимную индуктивность между обмотками преобразователя, а вместе с тем и напряжение на выходе прибора, пропорциональное измеряемой разности давлений.

Дифманометры ДМИ имеют класс точности 1,0 и рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 25 МПа с предельным номинальным перепадом давления от 630 до 25000 Па, а также от 0,04 до 0,1 МПа.

Дифманометры типа ДМ-Э и ДМ-ЭР представляют собой мембранные приборы компенсационного типа с унифицированным выходным сигналом постоянного тока 0 – 5 и 4 – 20 мА. Они применяются в комплекте с показывающими или самопишущими миллиамперметрами, а также регуляторами и другими устройствами автоматики. Дифманометры ДМ-ЭР предназначены для измерения расходов и имеют квадратичную зависимость между выходным сигналом и измеряемым перепадом давления, а дифманометры ДМ-Э – для измерения перепада давления, напора и разряжения. Эти дифманометры работают на принципе электрической силовой компенсации усилия, развиваемого чувствительным элементом.

На рис. 3.37 показана схема дифманометра расходомера ДМ-ЭР, состоящего из измерительной части (ИБ) и квадратичного преобразователя (ЭКП).

Вялая мембрана 2 с жестким центром делит внутренние полости дифманометров, образуемые фланцевыми крышками 1 и 13 на две рабочие

камеры. В правую камеру подводится давление p_1 , большее чем p_2 , подводимое в левую камеру. Два конусных диска 4 стягиваются в центре гайками 12 и штоком 6 для повышения прочности чувствительного элемента в случае односторонних перегрузок давления.

Сила, создаваемая жестким центром чувствительного элемента, воспринимается двумя плоскими пружинами 3, обеспечивающими свободное перемещение мембраны в направлении тягового усилия.

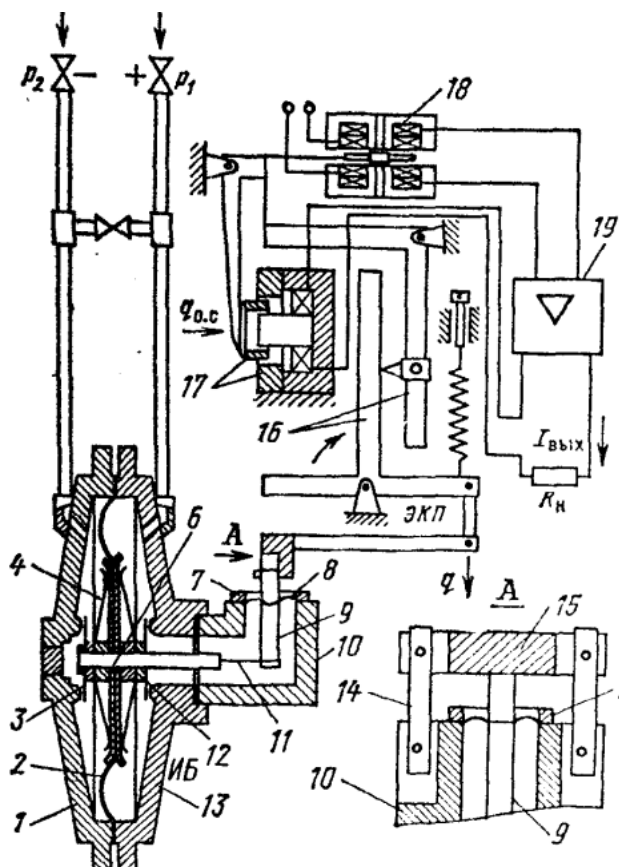


Рис. 3.37 - Дифманометр-расходомер электрический типа ДМ-ЭР

Связь жесткого центра мембраны с выводом рычага 9 осуществляется с помощью упругой ленточной тяги 11. Вывод рычага 9 из плюсовой полости уплотнен с помощью мембраны 8, прижатой по внутреннему диаметру траверсы 15 к рычагу 9. Наружный контур мембраны прижат к основанию 10 колодкой 7. Две упругие ленты 14 удерживают рычаг 9 от осевого перемещения при воздействии на мембрану рабочего давления.

Измеряемый перепад давления, воспринимаемый чувствительным элементом, преобразуется в

пропорциональное усилие q , которое с помощью рычажной системы 16 преобразователя автоматически уравнивается усилием q_{oc} , развиваемым устройством обратной связи 17 при протекании в нем постоянного тока. При изменении измеряемого перепада давления происходит изменение сигнала, вырабатываемого индикатором рассогласования 18 преобразователя. Сигнал рассогласования усиливается и преобразуется усилителем 19 в выходной сигнал постоянного тока, который поступает в линию дистанционной передачи

ко вторичному прибору или другому устройству, а также одновременно в обмотку силового устройства обратной связи.

Дифманометры ДМ-Э-1 и ДМ-ЭР-1 рассчитаны на предельно допустимое рабочее избыточное давление 0,25 МПа и выпускаются на предельные перепады от 160 до 1000 Па с классом точности 1,5. Модификации этих приборов ДМ-Э-2 и ДМ-ЭР-2 рассчитаны на предельное рабочее избыточное давление 1,0 МПа и имеют номинальные перепады давления от 1000 до 6300 Па, обеспечивая класс точности 1,0.

Дифманометры ДМПК-4 аналогичны дифманометрам ДМПК-100. Однако, у них вместо мембранных коробок используется вялая мембрана, связанная рычажной системой с пневматическим преобразователем. Эти приборы выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 250 до 400 Па при допустимом рабочем избыточном давлением 0,4 МПа. Они могут быть использованы для измерения разности давлений, избыточного и вакуумметрического давлений и работают в комплекте с пневматическими вторичными приборами и регуляторами.

Дифманометры сильфонные. В этих приборах в качестве упругого чувствительного элемента используются сильфоны (сильфонные блоки), воспринимающие перепад давления, и преобразующие его в механическое перемещение указательного устройства или в электрический и пневматический сигнал. К дифманометрам этой серии относятся приборы показывающие - типа ДСП, самопишущие - типа ДСС, а также «слепые» первичные преобразователи с электрическим выходным сигналом ДСЭ и пневматическим выходным сигналом ДС-П.

Рассмотрим на примере дифманометра типа ДСС, схема которого приведена на рис. 3.38, приборы с механическим преобразованием выходного сигнала.

Сильфонный блок дифманометра ДСС состоит из основания 7, являющегося одновременно перегородкой, на котором укреплены два рабочих сильфона 5 и 9.

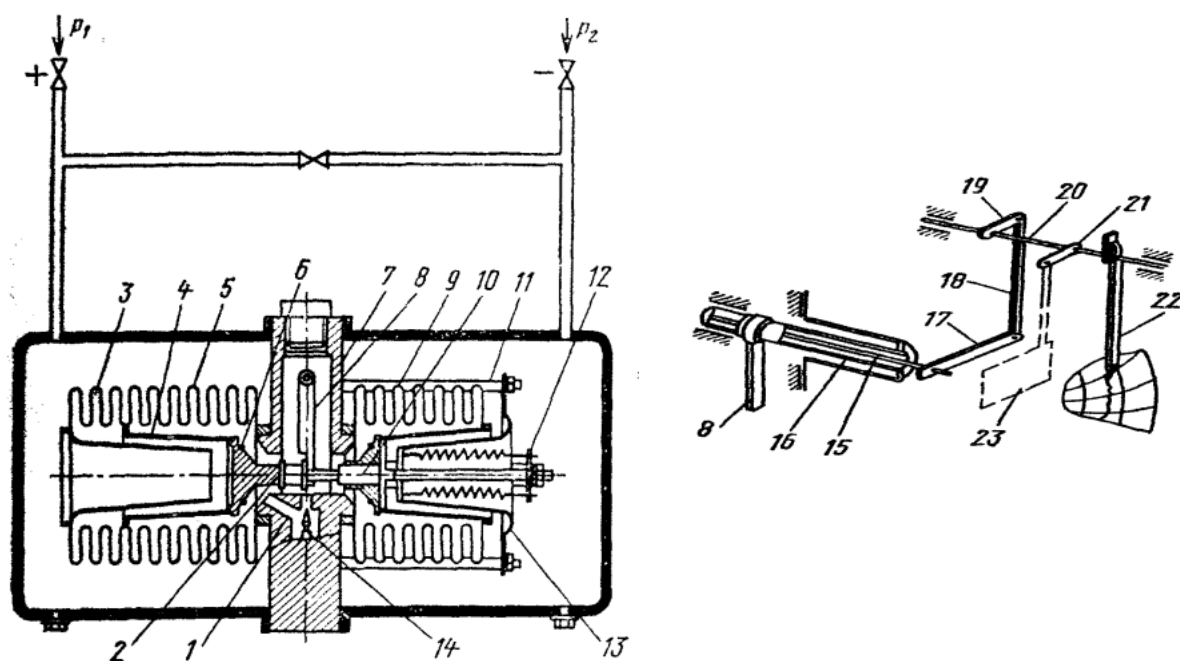


Рис. 3.38 - Сильфонный дифманометр типа ДСС

Сильфоны жестко связаны между собой штоком 10. На свободном конце штока расположен диск с винтовыми противодействующими пружинами 12. Левые концы этих пружин присоединены к нижней части неподвижного конуса 13, укрепленного с помощью шпилек 11 на перегородке 7. Оба сильфона одинаковых размеров и заполнены водно-глицериновой смесью.

Для уменьшения температурной погрешности прибора, вызываемой изменением объема жидкости, сильфон 5 снабжен температурным компенсатором 3 в виде трех дополнительных гофр. Внутренние полости температурного компенсатора и сильфона сообщаются между собой отверстиями в разделительном стакане 4, через которые перетекает жидкость при изменении ее объема, вызванного изменением температуры окружающей среды. Перепад давления подводится в камеры дифманометра через два запорных вентиля. Для сообщения между собой плюсовой и минусовой камер предусмотрен уравнильный вентиль, расположенный ниже запорных вентилях. Под воздействием разности давлений $p_1 - p_2$ сильфон 5 сжимается и жидкость из него частично перетекает через отверстие 1 в сильфон 9, вызывая перемещение его дна. При этом перемещается шток, жестко связанный с

сильфонами, и изменяет натяг противодействующих пружин. К штоку подсоединен рычаг 8, который при своем перемещении закручивает торсионную трубку 16 вместе с закрепленной на ней промежуточной осью 15 на некоторый угол. Эта ось с помощью рычага 17, шатуна 18 и поводка 19 поворачивает основную ось 20, на которой закреплено перо 22 для записи показаний прибора на дисковой диаграммной бумаге. Привод диаграммы осуществляется от синхронного двигателя или часового механизма. Данные дифманометры могут быть снабжены интегрирующими устройствами, тогда поводок 21 соединяют с помощью шатуна с поводком интегратора 23.

В дифманометре предусмотрено демпфирующее устройство в виде регулируемого клапана 14, которое позволяет устранить влияния пульсаций давления на результаты измерения. Для предотвращения разрушения сильфонного блока от разрушения при действии односторонних перегрузок давления, в дифманометре предусмотрено плавающее 2 и уплотняющее 6 резиновое кольцо, при помощи которых изменяется кольцевой зазор для перетока жидкости между сильфонами.

Дифманометры самопишущие типа ДСС выпускаются с дополнительным манометрическим механизмом, использующим трубчатую пружину Бурдона, для измерения и записи избыточного давления среды.

Сильфонные дифманометры типа ДКС, выполненные на базе дифманометра ДСС, имеют в своем составе корректирующие устройства по давлению и температуре измеряемой среды, что позволяет применять их при коммерческом учете неагрессивного газа и пара по перепаду давления на сужающих устройствах.

Дифманометры типа ДС, имеющие индекс «Н», рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 16,0 МПа и предельные номинальные перепады давления от 6300 до 25000 и на 0,04 и 0,063 МПа. Дифманометры с индексом «В» выпускаются на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 32 МПа и предельные номинальные перепады давления от 0,063 до 0,16 МПа.

Для дифманометров-уровнемеров типа ДС предельные номинальные перепады давления составляют 0,63 до 16 м.

Классы точности этих дифманометров составляют 1,0 и 1,5. Дифманометры же с коррекцией по давлению и температуре измеряемой среды при максимальных отклонениях давления и температуры от расчетных значений имеют класс точности 4,0.

Электрические сильфонные дифманометры типа ДСЭ имеют унифицированный выходной сигнал 0 – 5 мА и работают в комплекте с автоматическими миллиамперметрами и регуляторами. Эти дифманометры выпускаются в виде расходомеров (ДСЭР), напорометров (ДСЭН), тягомеров (ДСЭТ) и тягонапорометров (ДСЭТН). Конструкция дифманометра данного типа схематически приведена на рис. 3.39.

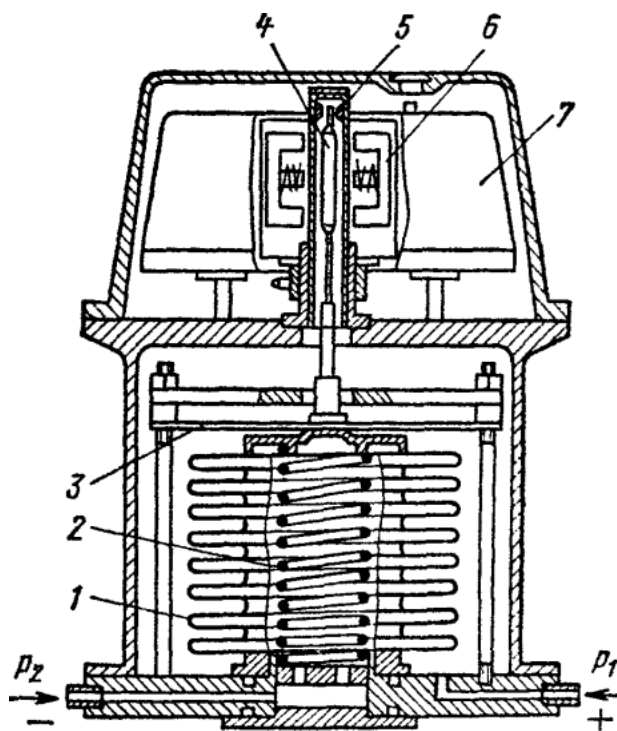


Рис.3.39 - Сильфонный дифманометр типа ДСЭ

Измерительный блок прибора состоит из сильфона 1, в который встроена винтовая цилиндрическая пружина 2. Жесткость устанавливаемых в сильфон пружин различна и зависит от предельного номинального перепада давления. Сильфон жестко соединен с плоской пружинной подвеской 3, к которой при помощи немагнитного штока связан магнитный плунжер 4. Плунжер находится в разделительной трубке 5 из немагнитной не ржавеющей стали. Преобразователь 6 с магнитной компенсацией закреплен

на втулке, надетой на разделительную трубку. К корпусу дифманометра крепится полупроводниковый усилитель 7. В приборе предусмотрена возможность перемещения преобразователя относительно плунжера для обеспечения предварительной регулировки нулевого выходного сигнала.

Корректировка нулевого выходного сигнала постоянного тока при эксплуатации дифманометра производится отдельным корректором нуля.

Дифманометры ДСЭ рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 0,025 МПа. Дифманометры-расходомеры ДСЭР выпускаются на предельные номинальные перепады давления от 1000 до 4000 Па и имеют класс точности 1,5. Дифманометры-тягомеры ДСЭТ и напоромеры ДСЭН, имеющие класс точности 1, выпускаются с верхними пределами измерения избыточного и вакуумметрического давления от ± 1000 до ± 4000 Па, соответственно. Дифманометр-тягонапоромер ДСЭТН-20 выпускается класса точности 1,5 и имеет верхний предел измерения вакуумметрического и избыточного давления 200 Па.

Дифманометры сильфонные пневматические. Приборы этого типа имеют на выходе унифицированный пневматический сигнал 0,02 – 0,1 МПа и предназначены для работы в комплекте со вторичными приборами и регуляторами пневматической ветви ГСП. К пневматическим дифманометрам

относится прибор типа ДС-П, схема которого приведена на рис. 3.40.

Сильфонный пневматический дифманометр состоит из блока измерения (ИБ) и пневмосилового линейного преобразователя (ПЛП). Действие этого прибора основано также на принципе компенсации усилия чувствительного элемента.

Измерительный блок состоит из двух камер (плюсовой и минусовой), разделенных основанием 7. В камерах расположены сильфоны 1 и 9, которые с одной стороны жестко связаны с основанием, а с другой - клапанами

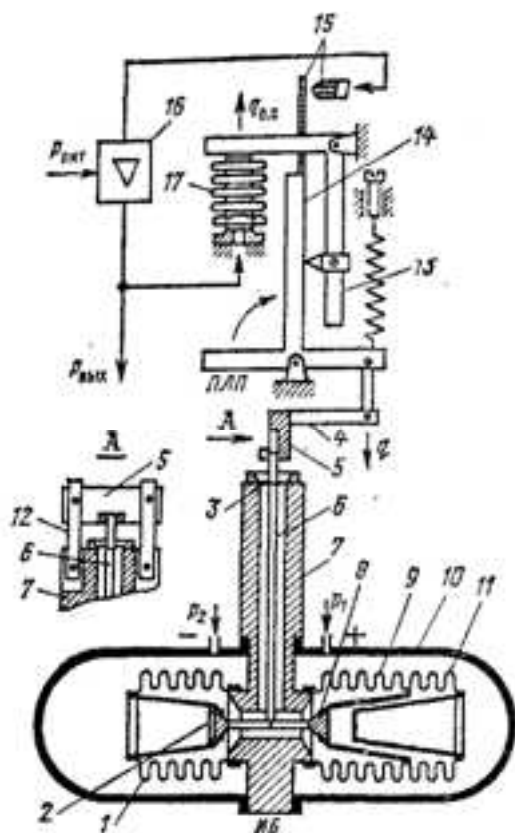


Рис. 3.40 - Дифманометр сильфонный пневматический типа ДС-П

2 и 8, снабженными уплотняющими кольцами из резины. Клапаны между собой связаны штоком, на котором закреплен рычаг 6. Внутренняя полость сильфонов заполнена кремнийорганической жидкостью. Изменение объема этой жидкости, вызванное колебаниями температуры окружающего воздуха и пульсациями рабочего давления, воспринимается компенсационным сильфоном 11.

Вывод рычага 6 из корпуса 10 уплотнен с помощью мембраны 3. Две упругие ленты 12 удерживают этот рычаг от осевого перемещения. Такая конструкция вывода обеспечивает возможность поворота рычага 6 с траверсой 5 относительно условной оси, образованной пересечением плоскости мембраны 3 и упругих лент.

Измеряемый перепад давления воспринимается чувствительными элементами 1 и 9, связанными с помощью рычагов 6 и 4 с преобразователем, и преобразуется в пропорциональное усилие q , которое с помощью рычажной системы 13 и 14 пневмосилового преобразователя автоматически уравнивается усилием q_{oc} сильфона обратной связи 17. При изменении измеряемого перепада давления и усилия q происходит малое (доли миллиметров) перемещение рычажной системы и связанной с ней заслонки индикаторного узла 15 типа сопло-заслонка. В этом узле перемещение сопла преобразуется в управляющий сигнал давления сжатого воздуха, который поступает на вход пневматического усилителя 16. Выходной сигнал усилителя $p_{вых}$, пропорциональный измеряемому перепаду давления, подается в линию дистанционной передачи ко вторичному прибору и одновременно в сильфон обратной связи.

Дифманометры типа ДС-П допускают в эксплуатации перегрузки, до десяти раз превышающие предельный номинальный перепад давления, но не превышающие 1,0 МПа.

Дифманометры пневматические ДС-П выпускаются трех типов: ДС-ПЗ, ДС-П4 и ДС-П5, отличающихся друг от друга только диаметрами сильфонов. Они рассчитаны на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 40

МПа и соответственно на предельные номинальные перепады давления от 4000 до 25000 Па; от 0,04 до 0,16 МПа и от 0,25 до 0,63 МПа.

Дифманометры ДС-ПЗ с предельным номинальным перепадом давления 4000 Па выпускаются классов точности 1,0 и 1,5. Дифманометры же с другими указанными выше номинальными перепадами давления имеют классы точности 0,6 и 1,0.

3.7. Установка и использование приборов давления

Установка конкретного измерителя (преобразователя) давления (ИПД) для измерения давления в контролируемом объекте должна производиться таким образом, чтобы исключить или свести к минимуму влияние на процесс измерения и эксплуатации прибора таких дестабилизирующих и опасных факторов, как высокие температуры измеряемой и окружающей среды, вибрации, химическая агрессивность и взрывоопасность сред и др.

С учетом предельных характеристик ИПД и конкретных условий окружающей среды приборы давления и преобразователи устанавливаются либо непосредственно в месте измерения давления, либо дистанционно на приборном щите с подводкой к измеряемой среде соединительных импульсных трубок и рукавов.

В случае необходимости приборы давления подключаются к объекту измерения при помощи мембранных разделителей, а также уравнительных и конденсационных сосудов. Кроме того, подключение ИПД должно осуществляться, как правило, через вентильный (клапанный) блок, позволяющий отключать прибор от точки измерения, а также подключать к измерителю давления в рабочих условиях контрольный образцовый прибор или осуществлять продувку импульсных линий.

При измерении давления химически агрессивных сред необходимо использовать ИПД с соответствующим защитным слоем чувствительного элемента или со встроенной внутренней защитно-разделительной мембраной из коррозионностойкого материала. Для защитных целей применяются также внешние и выносные разделительные сосуды с мембранами, которые могут

соединяться с ИПД прямым монтажом через штуцер или с помощью соединительных трубок.

Использование внешних мембранных разделителей позволяет применять обычные приборы давления в условиях, превышающих их защитные характеристики, т.к. разделители содержат, как правило, замкнутую полость между двумя разделительными мембранами, наполненную инертной жидкостью, например, силиконовым маслом.

На практике часто вместо мембранных разделителей используются устаревшие безмембранные разделительные сосуды, в которых часть сосуда заполняется измеряемой средой, а другая часть со стороны измерителя и соединительных трубок – передаточной (разделительной) жидкостью. Применение таких разделителей для измерения давления жидких сред недопустимо т.к. это может привести к смешиванию измеряемой и передаточной жидкостей. При измерении же давления газовых сред со временем будет происходить диффузия газов в разделительную жидкость, что приведет к увеличению погрешности измерения.

Соединительные импульсные трубки выполняются чаще всего из металла, что позволяет снизить температуру измерительной или передаточной среды до допустимого значения для конкретного измерителя давления. Для этого трубки не должны иметь тепловой изоляции, а их длина выбирается так, чтобы в месте установки прибора температура среды не превышала допустимого значения. При использовании длинных импульсных линий (не более 50 метров) у места ее присоединения к контролируемому объекту устанавливается дополнительный запорный вентиль для их отключения в случае аварии. Кроме того, трубки не должны вносить дополнительные погрешности в измерение давления. С этой целью их необходимо заполнять однофазной несжимаемой передаточной средой, а также подсоединять к объекту и прокладывать так, чтобы исключить образование в них газовых и воздушных пузырей при измерении давления жидких сред и образования конденсата при измерении давления газовых сред.

Схемы установки измерителей давления для различных контролируемых сред приведены на рис. 3.41.

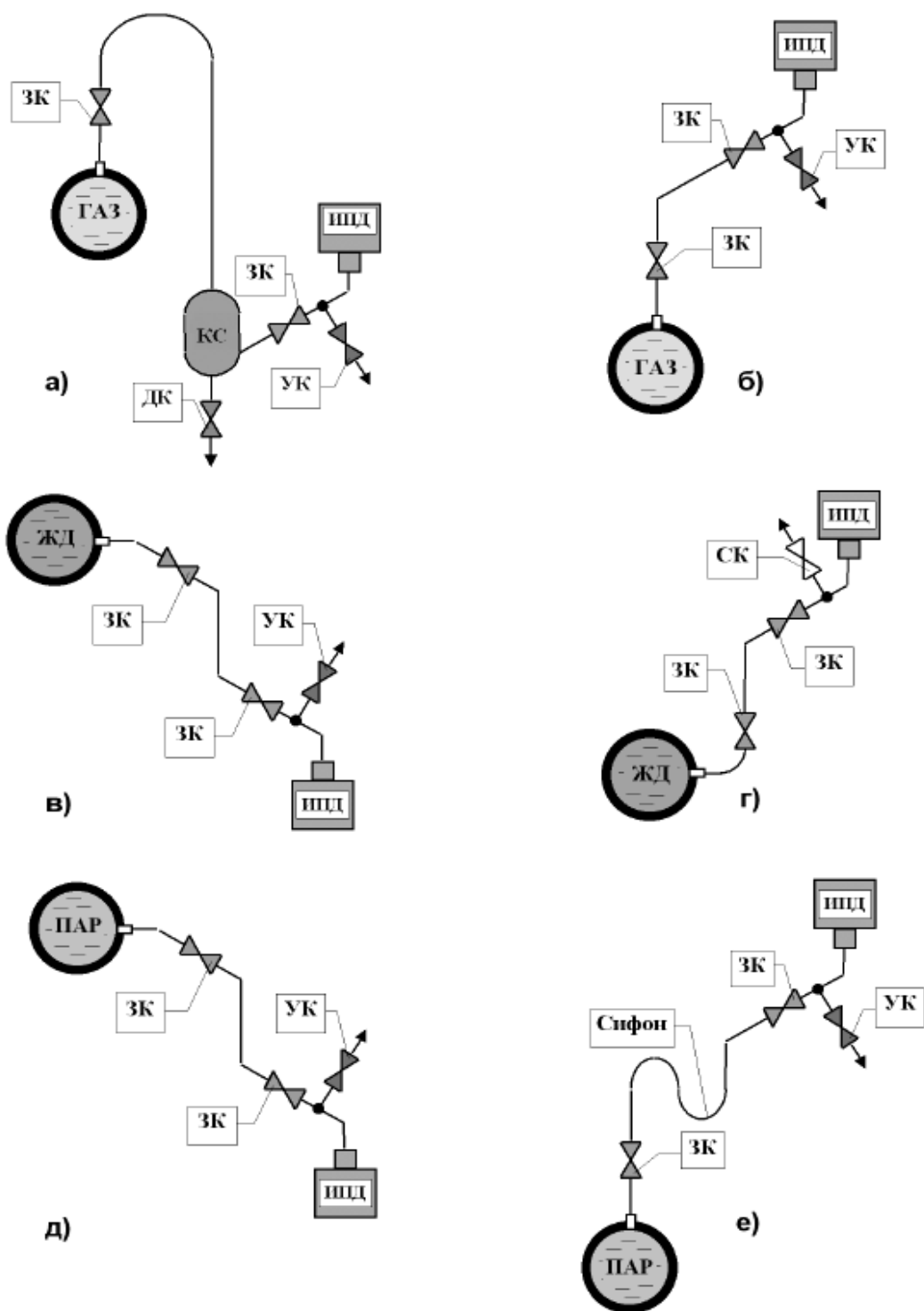


Рис. 3.41 - Схемы установки измерителей давления для газа, жидкости и пара⁷: при размещении ниже (а, в, д) или выше (б, г, е) уровня отбора

⁷ На рисунке обозначено: ИПД- измерительный преобразователь давления; ЗК - запорный клапан; УК - уравнильный клапан; СК - спусковой клапан; ДК - дренажный клапан; КС - конденсационный сосуд; ЖД - жидкость.

В соответствии с рис. 3.41 подключение импульсных трубок к объекту производится в средней его части при измерении давления жидких сред и сверху - при измерении газовых сред, а также с соблюдением уклона трубок в сторону, обеспечивающую удаление газов (уклон вниз) или конденсата (уклон вверх) в измеряемую среду. В этих же целях необходимо размещать ИПД для жидких сред ниже уровня отбора давления, а для газовых сред - выше этого уровня. Если такие условия трудновыполнимы, то в соединительных линиях предусматривают газосборники со спусковыми клапанами (эту функцию в ряде случаев могут выполнять уравнительные клапаны) или конденсатосборники с дренажными клапанами (вентильями) для периодического удаления побочной среды. Соединительные трубки должны быть защищены от переменных воздействий внешних источников тепла или холода (за исключением естественного постоянного теплообмена с окружающей средой).

При измерении давления водяного пара с использованием соединительных трубок невозможно избежать образования двухфазной среды в процессе охлаждения пара и передачи его давления через трубки на удалённый ИПД. Поэтому здесь ставится задача резкого перехода от пара к конденсату, который выполняет функцию несжимаемой передающей разделительной средой. С этой целью передача давления осуществляется либо через трубку с сифоном U-образной или кольцевой формы, в котором скапливается охлаждающийся конденсат, играющий роль водяного затвора, или через трубку с уравнительным конденсационным сосудом, который поддерживает постоянный уровень конденсата в системе передачи давления пара. Здесь необходимо отметить, что особенно важно поддержание постоянства и равенства уровней конденсата в соединительных трубках при измерении перепада давления пара и жидкости дифференциальными манометрами.

Что касается способов уменьшения влияния тряски и вибраций на работу приборов, то в этом случае можно рекомендовать применение амортизаторов в виде различного рода пружин или соответствующих мягких прокладок.

На месте измерения манометры лучше всего устанавливать таким образом, чтобы на них не действовало добавочное давление столба жидкости, в противном случае необходимо вводить поправку или градуировать их с включением этого добавочного давления, о чем тогда необходимо делать соответствующую надпись на шкале прибора. Если прибор будет расположен выше измеряемого пространства, то здесь также необходимо учитывать влияние столба жидкости, т.к. показания прибора в этом случае будут занижены.

При измерении пульсирующего давления необходимо перед прибором устанавливать дроссель в виде диафрагмы с небольшим отверстием. В тех случаях, когда необходимо измерить быстропеременные давления, целесообразно применять электрические методы измерения.

При выборе места измерения давления, или так называемого места отбора импульса, необходимо, чтобы в пространстве, где предполагается измерять давление, отсутствовали возмущения течения жидкости.

Таким образом, при измерении давления движущихся сред необходимо, чтобы приспособления для отбора импульса не вызывали возмущений течения потока. Особенно важно, чтобы края отверстия со стороны протекающей среды не были выступающими, т.к. малейшие выступы или заусеницы могут привести к неправильному замеру давления.

В ряде установок, где приходится измерять давление или разрежение газовоздушных потоков, несущих большое количество взвешенных твердых частиц, необходимо производить отбор импульса в таком месте газохода или трубопровода, где концентрация взвешенных твердых частиц наименьшая. На вертикальных трубопроводах следует предпочитать участки с нисходящим потоком среды, а на их горизонтальных участках наилучшим местом отбора является верхняя часть трубопровода. Это позволяет исключить попадание твердых частиц в импульсные трубки и сами приборы.

Контрольные вопросы

1. Объясните физическую сущность давления. Какие виды давления вам известны?
2. В каких единицах измеряется давление? Взаимосвязь между этими единицами.
3. Проведите классификацию средств измерения давления.
4. Перечислите известные вам жидкостные приборы для измерения давления. Запишите расчетные формулы для чашечного манометра.
5. Какие поправки необходимо вводить к показаниям жидкостных приборов давления? Запишите формулы для их расчета.
6. Какие типы упругих чувствительных элементов используются в приборах давления?
7. Перечислите основные характеристики упругих чувствительных элементов.
8. Покажите схематично конструкцию манометра с трубчатой пружиной. Как проводят расчет трубчатых пружин?
9. Перечислите электроконтактные приборы давления и укажите их назначение.
10. Для чего предназначаются дифференциальные манометры? Какие их типы вам известны?
11. Приведите формулы расчета поплавкового дифманометра.
12. Какими достоинствами и недостатками обладают дифманометры различных типов?
13. Чем отличаются преобразователи давления от измерителей? Какие современные преобразователи давления вам известны?
14. Перечислите основные методы установки приборов давления. Для чего используются жидкостные и мембранные разделители?

4. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДОВ СРЕД И КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛА

Измерение материальных и энергетических потоков в различных отраслях промышленности связано с необходимостью их контроля, учета и управления для правильного ведения технологических процессов. Количество вещества, проходящее через различные сечения трубопроводов и каналов, должно определяться наряду с другими технологическими параметрами, т.к. практически для всех технологических процессов этот параметр играет роль управляющего параметра и используется при коммерческом учете энергоносителей.

При измерениях, связанных с учетом количества жидкости, газа и пара, приходится определять количество вещества, проходящее за единицу времени или за какой-то промежуток времени. Это количество вещества выражают обычно в единицах объема или массы, единицами объема являются кубический метр, литр, а массы - килограмм и тонна.

Приборы, измеряющие количество вещества, протекающее через данное сечение трубопровода за некоторый промежуток времени (смену, сутки и т.д.), называют **счетчиками** количества. При этом количество вещества определяется как разность между двумя последовательными показаниями прибора в начале и конце этого промежутка. Показания счетчика могут выражаться в единицах объема или в единицах массы.

Приборы, измеряющие количество вещества, проходящее через данное сечение трубопровода в единицу времени (секунду, минуту, час и т.д.), называют **расходомерами**. Если расходомер снабжен интегрирующим устройством со счетчиком, то он выполняет функцию счетчика.

Измерения количества вещества связано с определением объемного расхода (Q_0), выражаемого в единицах объема за единицу времени, и массового расхода (Q_M), выражаемого в единицах массы за единицу времени.

Для получения сравнимых результатов при измерении объемного расхода газа, последний должен быть приведен к нормальным условиям (температура $t_H = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; давление $p_H = 101325\text{ Па}$; относительная влажность $\varphi_H = 0$).

В зависимости от принципа действия, наиболее часто применяемые в народном хозяйстве расходомеры и счетчики жидкости, газа и пара могут быть классифицированы следующим образом:

1. **Расходомеры переменного перепада давления.** Принцип действия этой группы расходомеров основан на зависимости перепада давления, создаваемого неподвижным устройством, устанавливаемым в трубопроводе, от расхода вещества.

К расходомерам переменного перепада давления относятся расходомеры:

- с сужающим устройством (принцип действия основан на зависимости перепада давления, образующегося в сужающем устройстве в результате частичного перехода потенциальной энергии потока в кинетическую, от расхода);
- с гидравлическим сопротивлением (принцип действия основан на зависимости перепада давления, образующегося на гидравлическом сопротивлении, от расхода);
- с напорным устройством (принцип действия основан на зависимости перепада давления, создаваемого напорным устройством в результате перехода кинетической энергии струи в потенциальную, от расхода);
- центробежные (принцип действия основан на зависимости давления, образующегося на закруглении трубопровода в результате действия центробежных сил в потоке, от расхода);
- струйные (принцип действия основан на зависимости перепада давления, образующегося при ударе струи, от расхода) и др.

2. **Расходомеры переменного уровня.** Принцип действия этих приборов основан на изменении уровня жидкости в сосуде при ее свободном истечении через отверстие в дне или боковой стенке сосуда.

3. **Расходомеры обтекания.** У этих приборов перемещение тела, воспринимающего динамическое давление обтекающего его потока, зависит от расхода вещества. К расходомерам обтекания относятся расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры, поплавковые, пружинные), поплавково-пружинные и с поворотной лопастью.

4. **Тахометрические расходомеры.** Принцип действия их основан на зависимости скорости движения тела, установленного в трубопроводе, от расхода вещества. В эту группу входят:

- камерные расходомеры с одним или несколькими подвижными элементами, отмеривающими при своем движении определенные объемы жидкости или газа; к ним относятся шестеренчатые (с вращающимися шестернями), лопастные (с лопастями, совершающими сложное вращательно-поступательное движение), роторные (с вращающимися роторами) винтовые (с роторами винтовой формы), поршневые и др.;

- турбинные с вращающейся крыльчаткой;

- шариковые с движущимся шариком.

5. **Электромагнитные расходомеры.** Принцип действия этих приборов основан на взаимодействии расхода движущейся жидкости с магнитным полем, создаваемым вокруг трубопровода.

6. **Акустические расходомеры.** В приборах этого типа создается зависимый от расхода акустический эффект в потоке; к этой группе приборов относятся ультразвуковые расходомеры, использующие звуковые колебания частотой свыше 20 кГц.

7. **Вихревые расходомеры.** Принцип их действия основан на зависимости частоты колебаний, возникающих в потоке, в процессе вихреобразования от расхода.

Кроме перечисленных расходомеров и счетчиков существуют другие приборы, основанные на других зависимостях (например, тепловые, оптические, ионизационные, меточные, и др.), а также парциальные, которые

позволяют с помощью небольшого расходомера или счетчика количества контролировать потоки в трубопроводах больших диаметров.

Рассмотрим принципы действия и устройство некоторых из перечисленных выше приборов измерения расхода.

4.1. Измерение скоростей и расходов напорными трубками

Напорные трубки применяются для измерения скорости потоков жидких и газообразных сред при экспериментальных исследованиях, в лабораторных и в производственных условиях. Специальные напорные трубки применяют, кроме того, для измерения скорости полета летающих аппаратов и т.д.

Измерение скорости движения жидкости или газа напорным трубками сводится к измерению динамического давления (скоростного напора), которое равно разности полного P_{Π} и статического P_C давлений и связано со скоростью соотношением, получаемым из уравнения Бернулли:

$$\Delta P = P_{\Pi} - P_C = \frac{\rho \cdot V^2}{2}, \quad (4.1)$$

откуда

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}, \quad (4.2)$$

где V – скорость течения измеряемой среды, м/с;

ρ – плотность измеряемой среды, кг/м³;

ΔP – перепад давлений, Па.

Таким образом, для определения динамического давления, равного измеренному перепаду давления, а следовательно, и скорости в данной точке потока необходимо измерить разность полного и статического давлений. Измерение данного давления может быть осуществлено напорной трубкой с отверстием на лобовом ее конце (в критической точке), установленной навстречу движению потока, а статическое давление – через одно или несколько отверстий в стенке трубопровода (см. рис. 4.1).

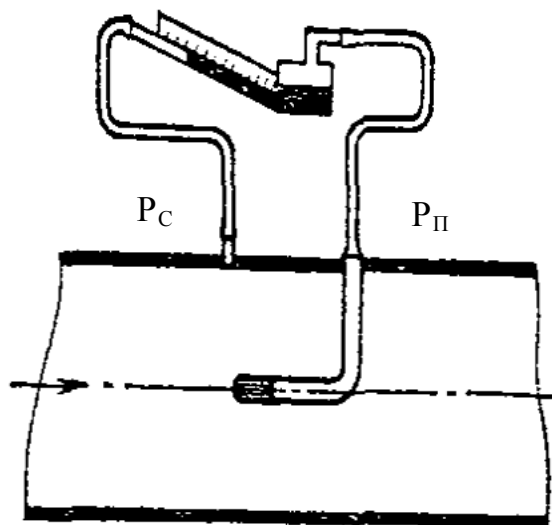


Рис. 4.1 - Схема измерения динамического давления

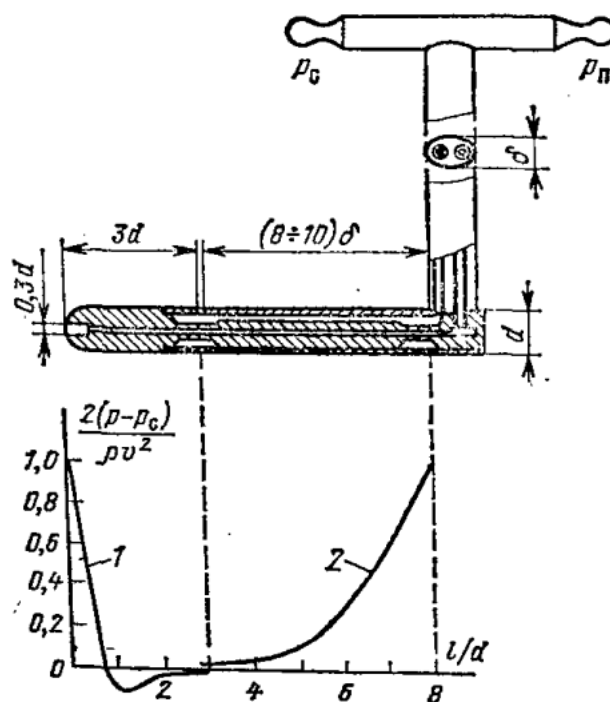


Рис. 4.2 - Комбинированная напорная трубка Пито

Так для определения скорости в данной точке потока, необходимо измерить только перепад давления, подключив обе трубки к микроманометру или жидкостному дифманометру. В уравнения (4.1) и (4.2) входит плотность среды, которая для рабочих условий должна быть определена с максимальной возможной точностью.

Этот метод впервые был применен в 1732 году Пито для измерения скорости воды, поэтому такую напорную трубку, схематично показанную на рис. 4.2, называют трубкой Пито.

Развитие этого метода измерения скоростей потока привело к созданию комбинированных напорных трубок, снабженных отверстиями для приема как полного, так и статического давлений. В настоящее время применяют различные конструкции напорных трубок для лабораторных и промышленных измерений скоростей потока. Однако, необходимо иметь в виду, что динамическое давление не может быть измерено абсолютно точно, т.к. ни одна конструкция трубки не позволяет производить отбор давлений строго в одной точке потока. Поэтому в правую часть формулы (4.2) необходимо вводить

поправочный коэффициент K_T , определяемый при тарировке различных конструкций трубок.

При измерении скоростей газа, при которых $1 > \frac{V_T}{a} > 0,2$ (здесь a – скорость звука в данной среде), вместо формулы (4.2) необходимо пользоваться следующим соотношением:

$$V = K_T \cdot \sqrt{2 \cdot T \cdot R \cdot \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{II}}{p_C} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]}, \quad (4.3)$$

где T – термодинамическая температура;

R – газовая постоянная;

k – показатель адиабаты.

Из числа существующих напорных трубок широко применяется трубка Пито с полусферической головкой наконечника, снабженная державкой (см. рис.4.2). В этой трубке полное давление потока передается через отверстие на лобовом конце наконечника трубки, а статическое - через узкую прерывистую щель на поверхности наконечника. По каналам в теле цилиндрического наконечника и в державке трубки давления передаются к прибору, измеряющему разность давлений.

На рис. 4.2 приведены также кривые, характеризующие распределение давлений по поверхности наконечника трубки с учетом влияния, оказываемого державкой (трубкой, перпендикулярной к наконечнику). Здесь кривая 1 характеризует распределение давлений вдоль образующей наконечника трубки без учета влияния, оказываемого державкой, а кривая 2 характеризует распределение давлений, обусловленных влиянием державки.

В лобовой (критической) точке наконечника соблюдается соотношение $\frac{2\Delta P}{\rho V^2} = 1$, что и обуславливает выполнение отверстия для измерения полного давления потока именно в этой точке. На поверхности наконечника трубки имеется область, отвечающая отношению $l/d = 3$, для которой с достаточной степенью приближения можно принять $p = p_C$, и это является обоснованием

выбора места щели на поверхности трубки для измерения статического давления.

При применении дифференциальной трубки необходимо учитывать, что трубка с большим диаметром d наконечника может вызвать изменение распределения скоростей в потоке в том месте, где производится измерение, а при измерении скоростей газовых потоков до 25 м/с использование трубки не эффективно из-за малого перепада давления.

Для определения объемного расхода потока среды необходимо знать среднюю его скорость, которая, будучи умноженной на площадь сечения трубопровода, даст количество вещества, протекающего через трубопровод в единицу времени. Скорость потока в различных точках его сечения неодинакова. В трубопроводе она достигает максимального значения в центральной части сечения и уменьшается по направлению к стенкам. Скорость же, измеренная с помощью напорной трубки, соответствует местной скорости потока в той точке, где установлена трубка. Поэтому для определения средней скорости потока сечения трубопровода разбивают на n участков с равными площадями и измеряют скорость в определенной точке каждого участка. С учетом этого объемный расход определится в соответствии со следующим выражением:

$$Q_o = K_T \cdot F \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{\text{CP}}}{\rho}}, \quad (4.4)$$

где $\Delta p_{\text{CP}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_i}{n}$ - средний перепад давления по сечению трубопровода, Па;

F – площадь поперечного сечения трубопровода, м².

Пересчет объемного расхода в массовый производится по формуле:

$$Q_m = \rho \cdot Q_o, \quad (4.5)$$

где ρ – плотность измеряемой среды кг/м³.

Способ измерения средней скорости при помощи напорных трубок наряду со многими положительными качествами имеет и ряд недостатков. Он

требует больших затрат времени и расчетов, а также использования достаточно точных приборов для измерения динамического давления. Кроме того, для измерения газовых потоков с быстро изменяющимися скоростями и давлениями напорные трубки, обладающие значительной инерционностью, непригодны.

4.2. Измерение расхода при помощи сужающих устройств

4.2.1. Основы теории

Одним из наиболее распространенных и изученных является способ измерения расхода жидкостей, газов и пара в трубопроводах по перепаду давления в сужающих устройствах. При этом сужающие устройства выполняют функцию первичного преобразователя (датчика) скорости потока в перепад давления. В местах установки сужающих устройств образуется местное сужение потока вещества, вследствие чего его скорость повышается по сравнению со скоростью до сужения. Увеличение скорости потока приводит к увеличению его кинетической энергии и к уменьшению потенциальной в суженном сечении. Следовательно, в соответствии с законом Бернулли, статическое давление в суженном сечении будет меньше, чем в сечении до сужающего устройства. Таким образом, при протекании вещества через сужающее устройство создается перепад давления ΔP , зависящий от скорости потока и, следовательно, расхода вещества. Полученный на сужающем устройстве перепад давления может быть измерен при помощи различного типа дифманометров, подключаемых к двум отверстиям в трубопроводе, расположенным до и после сужающего устройства.

В качестве сужающих устройств для измерения расходов жидкости, газа и пара широко применяются стандартные диафрагмы, сопла, сопла и трубы Вентури. В отдельных случаях при измерениях расхода могут находить также применение нестандартные типы сужающих устройств.

На примере диафрагмы, установленной в трубопровод, рассмотрим процессы, протекающие в нем.

На рис. 4.3 показана диафрагма, представляющая собой тонкий диск с отверстием круглого сечения посередине, центр которого совпадает с осью трубопровода. Сужение потока начинается до диафрагмы и на некотором расстоянии за ней поток достигает максимального сужения. После сужения поток постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. В соответствии с характером потока вещества по трубопроводу с сужающим устройством распределение давления происходит следующим образом: до начала сужения поток имеет статическое давление P'_1 ; при сужении потока на фронтальной поверхности диафрагмы давление повышается до значения P_1 за счет его торможения; на задней поверхности же диафрагмы давление снижается до значения P_2 ; в самом узком сечении потока за диафрагмой давление падает до значения P'_2 ; при полном расширении потока после диафрагмы его давление примет значение P_3 . Причем значение давления $P_3 < P_1$ за счет потерь давления, вызванных завихрениями потока после сужающего устройства. Показанный на

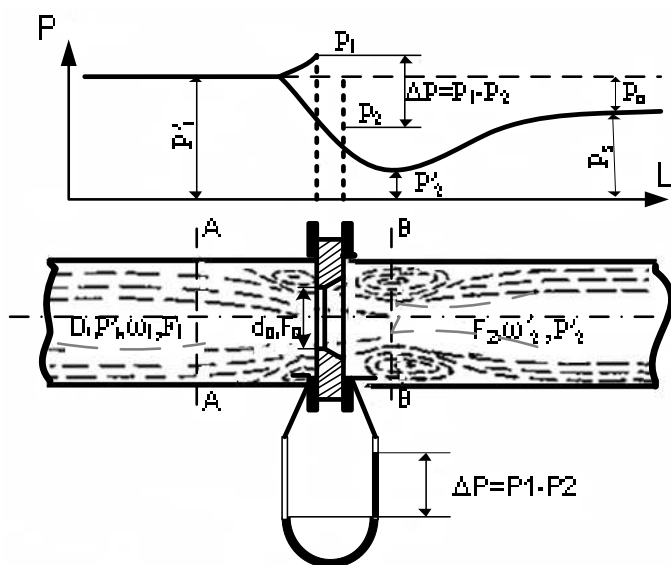


Рис. 4.3 - Диафрагма в трубопроводе

рис. 4.3 отбор давлений P_1 и P_2 осуществляется до и после диска диафрагмы в углах, образуемых плоскостью диафрагмы и внутренней поверхностью трубопровода, что соответствует угловому способу отбора перепада давления.

Характер распределения давлений в потоке для сопел и труб Вентури аналогичен

распределению давлений, показанному на рис.4.3. Однако необходимо принять во внимание, что потери давления на сужающих устройствах при одинаковом перепаде $\Delta P = P_1 - P_2$ уменьшаются в следующем порядке: **диафрагма – сопло – сопло Вентури – труба Вентури**.

При математическом анализе движения жидких и газообразных сред через сужающие устройства исходят из уравнения Бернулли и уравнения неразрывности, учитывая при этом сжимаемость (газ, пар) или несжимаемость (жидкость) среды.

Рассмотрим поток между сечениями трубопровода А-А и В-В (рис.4.3), в котором установлена диафрагма, а также примем допущение, что скорости частиц потока по всему сечению равны средней скорости и направлены параллельно оси трубопровода.

Воспользовавшись общим уравнением закона сохранения энергии

$$\int \omega d\omega = -\rho^{-1} \int dP \quad , (4.6)$$

для случая несжимаемой жидкости ($\rho_1 = \rho_2 = \rho = \text{const}$), получим:

$$\frac{\rho}{2} (\omega_2'^2 - \omega_1'^2) = P_1' - P_2' \quad , (4.7)$$

где P_1' и P_2' – абсолютные давления в сечениях А-А и В-В соответственно, Па;

ω_1 и ω_2' – средние скорости в соответствующих сечениях А-А и В-В, м/с;

ρ – плотность среды перед сужающим устройством, кг/м³.

Согласно условию неразрывности струи для несжимаемой жидкости, количество вещества, проходящее через любые сечения трубопровода, остается постоянным, тогда

$$F_1 \cdot \omega_1 = F_2 \cdot \omega_2' \quad , (4.8)$$

где F_1 и F_2 – площади сечения струи в А-А и В-В соответственно, м².

Выражая площадь сечения струи F_2 через площадь отверстия сужающего устройства F_0 и коэффициент сужения струи, запишем:

$$F_2 = \mu_1 \cdot F_0 \quad . (4.9)$$

Подставляя значение F_2 в (4.8), выразим значение скорости ω_1 :

$$\omega_1 = \mu_1 \frac{F_0}{F_1} \cdot \omega_2' \quad . (4.10)$$

В этом выражении отношение $\frac{F_0}{F_1} = \frac{d^2}{D^2} = m$ называется относительной

площадью или модулем сужающего устройства, здесь d и D – диаметры отверстия сужающего устройства и внутренней части трубопровода при рабочей температуре.

Исходя из выражений (4.10) и (4.7), определим скорость потока в его наиболее узком сечении F_2 :

$$\omega'_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu_1^2 \cdot m^2}} \sqrt{\frac{2 \cdot (P'_1 - P'_2)}{\rho}}. \quad (4.11)$$

Однако, как отмечалось выше, перепад давления на диафрагме в основном измеряется в углах до и после нее. Кроме того, в реальном потоке имеет место потеря скорости за счет вязкого трения среды о стенки трубопровода. Поэтому в действительных условиях, а также из-за замены давлений P'_1 и P'_2 давлениями P_1 и P_2 , в формулу (4.11) необходимо ввести поправочный коэффициент ξ и тогда эта формула для средней скорости в наиболее узком сечении потока примет вид:

$$\omega_2 = \frac{\xi}{\sqrt{1 - \mu_1^2 \cdot m^2}} \sqrt{\frac{2 \cdot (P'_1 - P'_2)}{\rho}}. \quad (4.12)$$

Отсюда уравнение объемного расхода через отверстие сужающего устройства с учетом выражения (4.9) определится следующим образом:

$$Q_0 = \frac{\mu_1 \cdot \xi}{\sqrt{1 - \mu_1^2 \cdot m^2}} \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}, \quad (4.13)$$

где Q_0 – объемный расход через сужающее устройство, $\text{м}^3/\text{с}$;

$\Delta P = P_1 - P_2$ – перепад давления на сужающем устройстве, Па.

В случае измерения расхода сжимаемой жидкости, газа или пара необходимо учитывать изменение плотности измеряемой среды в связи с изменением давления при прохождении ее через сужающее устройство. Коэффициент сужения μ_1 для сжимаемой среды зависит от отношения давлений P_2/P_1 , что влечет увеличение наименьшего сечения струи потока за диафрагмой из-за увеличения объема сжимаемой среды при уменьшении давления за сужающим устройством. Для учета расширения сжимаемой среды за сужающим устройством в уравнение расхода (4.13) необходимо вводить поправочный множитель ε , определение которого будет приведено далее.

Коэффициенты μ_1 и ξ , приведенные в уравнении (4.13), зависят друг от друга и не могут быть с достаточной точностью определены отдельно. Поэтому их объединяют в один общий коэффициент α , называемый коэффициентом расхода сужающего устройства, определяемый по эмпирическим зависимостям:

$$\alpha = \frac{\mu_1 \cdot \xi}{\sqrt{1 - \mu_1^2 \cdot m^2}} \quad (4.14)$$

Учитывая выражение для коэффициента расхода (4.14) и коэффициент расширения для сжимаемой среды ε , уравнение расхода (4.13) для общего случая может быть переписано в виде

$$Q_0 = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho}}, \quad (4.15)$$

причем для несжимаемой жидкости $\varepsilon = 1$.

4.2.2. Характеристики стандартных сужающих устройств

Широкое применение сужающих устройств при измерении расхода, а также достаточно полные исследования позволили их нормализовать и использовать по результатам расчетов без индивидуальной градуировки в комплекте с дифманометрами для измерения в горизонтальных, наклонных и вертикальных трубопроводах.

Изготовление и установка сужающих устройств должны соответствовать правилам, которые оговариваются в нормативной документации РД-50-213-80.

Диафрагма. Стандартные диафрагмы являются наиболее простыми по конструкции и могут применяться в трубопроводах с диаметром при нормальной температуре $D_{20} \geq 50$ мм, для которых модуль находится в диапазоне $0,7 \geq m \geq 0,05$.

Стандартная диафрагма схематически показана на рис. 4.4.

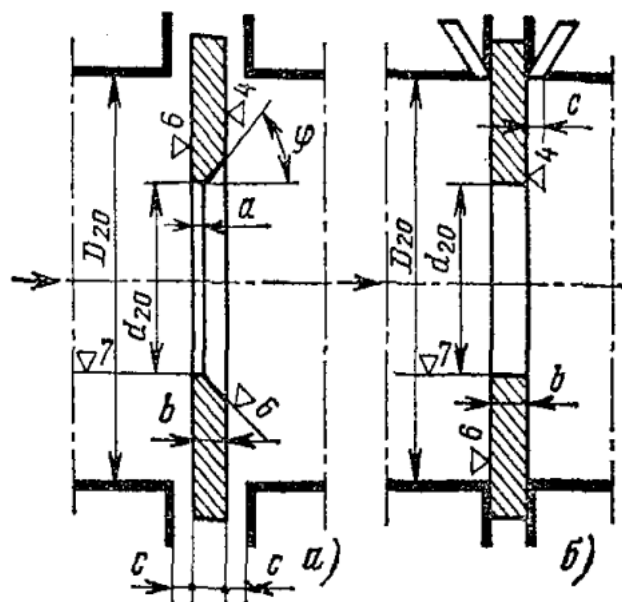


Рис. 4.4 - Стандартная диафрагма
а- с коническим расширением на выходе
потока; б- без расширения.

Она представляет собой тонкий диск с отверстием диаметра d_{20} , центр которого совпадает с центром поперечного сечения трубопровода. Отверстие диафрагмы

со стороны входа потока имеет прямоугольную кромку. Длина цилиндрического отверстия a должна находиться в пределах от $0,005D_{20}$ до $0,02D_{20}$ а при $m > 0,5$ длина его должна равняться $b/3$. При толщине диафрагмы $b > 0,02D_{20}$ цилиндрическое отверстие должно иметь коническое расширение к выходу потока. Угол наклона φ этого расширения к оси диафрагмы лежит в пределах $30 - 45^\circ$. В случаях, когда толщина $b \leq 0,02D_{20}$, диафрагмы могут быть изготовлены и без конического расширения, что имеет место для трубопроводов с большими диаметрами ($D_y \geq 450$ мм) и при малых давлениях среды.

Толщина стандартной диафрагмы обычно не превышает $0,05 D_{20}$ - и в большинстве случаев составляет $2,5 - 15$ мм. Наименьшая необходимая толщина диска диафрагмы при перепаде давления $\Delta p \geq 16$ кПа должна определяться расчетным путем, исходя из условий механической прочности диафрагмы.

Шероховатость поверхностей диафрагмы должна соответствовать классам чистоты, указанным на рис. 4.4. На кромках отверстий диафрагмы не должно быть зазубрин и заусенцев. Особое внимание уделяется на обработку входной кромки (она должна быть острой, не должна иметь закруглений, царапин и т.п.).

Отбор давлений p_1 и p_2 можно осуществлять при помощи отдельных цилиндрических отверстий в обойме диафрагмы или кольцевых камер, каждая из которых соединяется с внутренней полостью трубопровода группой прямоугольных отверстий, равномерно расположенных по окружности.

Стандартные диафрагмы типа ДК с кольцевыми камерами предназначены для трубопроводов с условными проходами $D_y = 50 - 500$ мм и рабочих давлений и температур, соответствующих условным давлениям p_y до 100 атмосфер. Бескамерные же диафрагмы типа ДБ предназначены для трубопроводов с $D_y = 400 - 1600$ мм и p_y до 25 атмосфер.

Сопло. Стандартное сопло, схема которого приведена на рис. 4.5, может применяться без градуировки в трубопроводах диаметром $D_{20} \geq 50$ мм при

одновременном соблюдении условия $0,05 \leq m \leq 0,65$.

Профильная часть входного отверстия сопла должна быть выполнена с плавным сопряжением дуг радиусами $r_1 = 0,2 d_{20}$ и $r_2 = d_{20}/3$. Дуга, проведенная радиусом r_2 , должна сопрягаться с выходной цилиндрической частью сопла. У сопла, показанного на рис.4.5-б, дуга, проведенная радиусом r_1 , доходит только до точки на торце сопла, лежащей на диаметре D_{20} . Отклонение радиусов дуг от номинальных значений не превышает 10% для $m \leq 0,25$ и 3% при $m > 0,25$.

На выходе цилиндрическая часть отверстия сопла заканчивается расточкой ($n \leq 0,03 d_{20}$ и $n_1 \leq 0,03 d_{20}$), предохраняющей выходную кромку от повреждений. Выходная кромка должна быть острой и не должна иметь закруглений, фасок, заусенцев и т.п. Шероховатость рабочих поверхностей сопла соответствует классам чистоты, указанным на рис.4.5, а соотношения основных размеров составляют: $l = 0,304 d_{20}$; $l_1 = 0,3 d_{20}$; $l_2 = 1,5 d_{20}$; $L = 0,604 d_{20}$; $b \leq 0,1 D_{20}$; $x = 0,2 d_{20} - \sqrt{0,75 d_{20} D_{20} - 0,25 D_{20}^2 - 0,5225 d_{20}^2}$.

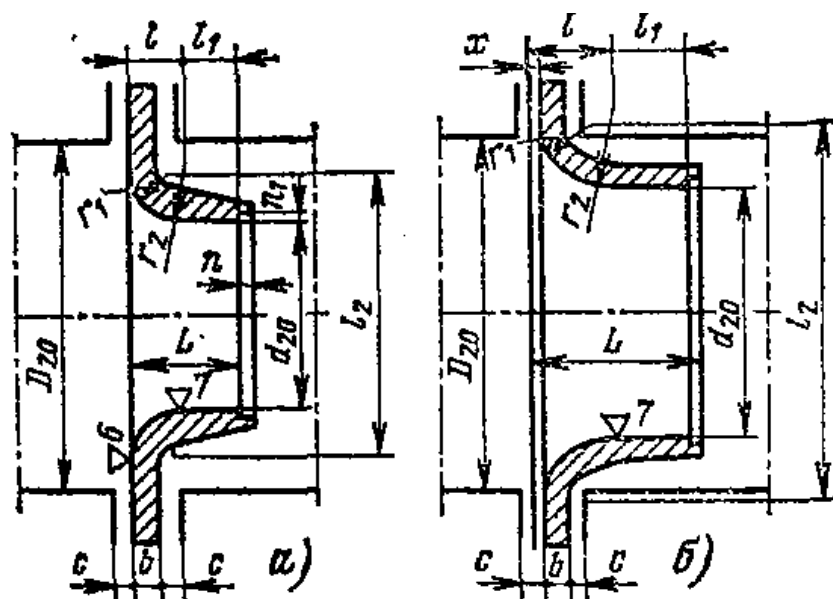


Рис. 4.5 - Стандартное сопло:
а - для $m \leq 0,444$; б - для $m > 0,444$

Измерение перепада давления в сопле производится через две кольцевые камеры или через отдельные цилиндрические отверстия. Сопло менее чувствительно к загрязнению и коррозии. Загрязнение или незначительное изменение входного профиля сужающего устройства в процессе эксплуатации

влияет на коэффициент расхода сопла в значительно меньшей степени, чем на коэффициент расхода диафрагмы. При одних и тех же значениях m и перепадах давления сопло позволяет измерять больший расход вещества, чем диафрагма. Кроме того, при измерении расхода пара и газа сопло обеспечивает более высокую точность.

Сопло Вентури. Из числа существующих форм труб Вентури нормализована труба с входной частью, выполненной так же, как и стандартное сопло. Поэтому сужающее устройство этого типа получило название стандартного сопла Вентури, схема которого приведена на рис. 4.6.

Сопло Вентури может быть изготовлено с длинным и коротким диффузором (конусом). У длинного сопла Вентури диффузор на выходе имеет диаметр, равный диаметру трубопровода (рис. 4.6, нижняя половина). Короткое сопло Вентури имеет диаметр на выходе у диффузора меньше диаметра трубопровода (рис. 4.6, верхняя половина). Сопло Вентури может применяться без градуировки для измерения расхода различных сред в трубопроводах диаметром $D_y \geq 50$ мм при одновременном соблюдении условия $0,05 \leq m \leq 0,6$.

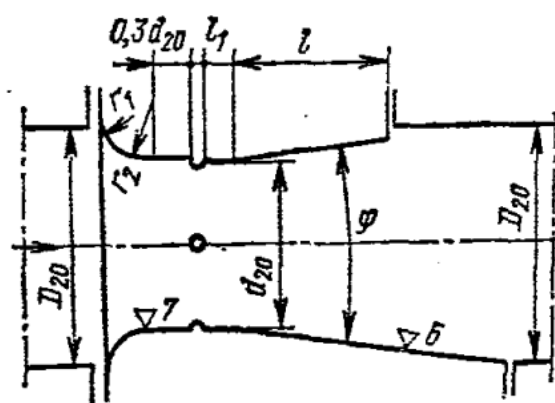


Рис. 4.6 - Стандартное сопло Вентури (верхняя половина - короткое; нижняя половина - длинное)

Входная часть сопла Вентури выполняется аналогично входной части обычного стандартного сопла. Выходная цилиндрическая часть сопла соединяется с диффузором, угол конусности которого $\varphi = 5 - 30^\circ$.

Отбор давлений p_1 и p_2 в соплах Вентури производится через кольцевые камеры, причем давление p_2 отбирается на расстоянии l_1 (см.рис.4.6), которое равно $0,2d_{20} - 0,4d_{20}$ в зависимости от размеров

кольцевой камеры, соединяющейся с внутренней цилиндрической полостью сопла через отверстия, равномерно расположенные по окружности. Число

отверстий сопла Вентури должно быть не меньше четырех, а диаметр их составляет не более $0,13d_{20}$ и не меньше 3 мм.

Кольцевая камера для отбора давления p_1 в соплах Вентури соединяется с внутренней полостью трубопровода с помощью кольцевой щели или группы отверстий, расположенных по окружности.

Наличие у сопла Вентури (как и у трубы Вентури) выходного диффузора способствует более полному и плавному восстановлению потенциальной энергии потока после его сужения. Поэтому потери давления в этих сужающих устройствах значительно меньше, чем у диафрагмы и обычного сопла. Сопло Вентури обычно применяется в тех случаях, когда, в силу технологических особенностей некоторых установок и процессов, недопустимы большие потери давления, возникающие в процессе измерения расходов вещества.

4.2.3. Коэффициенты расхода и поправочные множители к ним

В уравнение объемного расхода (4.15) входит ряд коэффициентов, которые определяются по эмпирическим зависимостям или по графикам. Основным коэффициентом, характеризующим любое сужающее устройство, является коэффициент расхода α . Этот коэффициент зависит от плотности измеряемой среды, ее вязкости, скорости потока и геометрических размеров самого сужающего устройства. Кроме того, коэффициент расхода зависит от шероховатости внутренних стенок трубопровода и чистоты обработки поверхностей сужающего устройства.

В общем случае зависимость коэффициента расхода сужающего устройства может быть представлена следующей функциональной зависимостью:

$$\alpha = f(\text{Re}_D, m). \quad (4.16)$$

Здесь Re_D – число Рейнольдса, отнесенное к внутреннему диаметру трубопровода и определяемое по объемному расходу в соответствии с формулой:

$$Re_D = 0,354 \cdot \frac{Q_o}{D \cdot \nu}, \quad (4.17)$$

где ν – кинематическая вязкость среды в рабочих условиях, m^2/s .

Определение числа Рейнольдса для газов в нормальном состоянии производится по формуле

$$Re_D = 0,354 \cdot \frac{Q_H \cdot \rho_H}{D \cdot \nu \cdot \rho}, \quad (4.18)$$

где ρ_H, ρ – плотности газа в нормальном и рабочем состоянии, соответственно.

Q_H – расход сухого газа, приведенный к нормальным условиям.

Перевод расхода сухого газа из рабочего состояния при P_1 и T_1 в нормальное состояние производится по следующей формуле:

$$Q_H = Q_o \cdot \frac{P_1 \cdot T_H}{T_1 \cdot P_H \cdot z}, \quad (4.19)$$

где z – коэффициент сжимаемости газа;

P_H, T_H – абсолютное давление и температура при нормальных условиях.

Зависимость коэффициента расхода сужающих устройств проявляется тем сильнее, чем меньше значение Re_D , поэтому сужающие устройства применяются для определения расхода потоков в областях скоростей, где имеется развитое турбулентное течение. В этих областях коэффициенты расхода являются постоянными в пределах ошибки их определения (см. рис.4.7 и рис. 4.8).

Значение числа Рейнольдса, начиная от которого коэффициент расхода не меняет своего значения для различных модулей m сужающего устройства, называют граничным ($Re_{D_{гр}}$). Его значение зависит только от типа сужающего устройства. Граничные значения чисел Рейнольдса для стандартных сужающих устройств в зависимости от их модуля приведены в таблице 4.1. Коэффициенты расхода, определенные для сужающих устройств при $Re > Re_{D_{гр}}$, называются исходными.

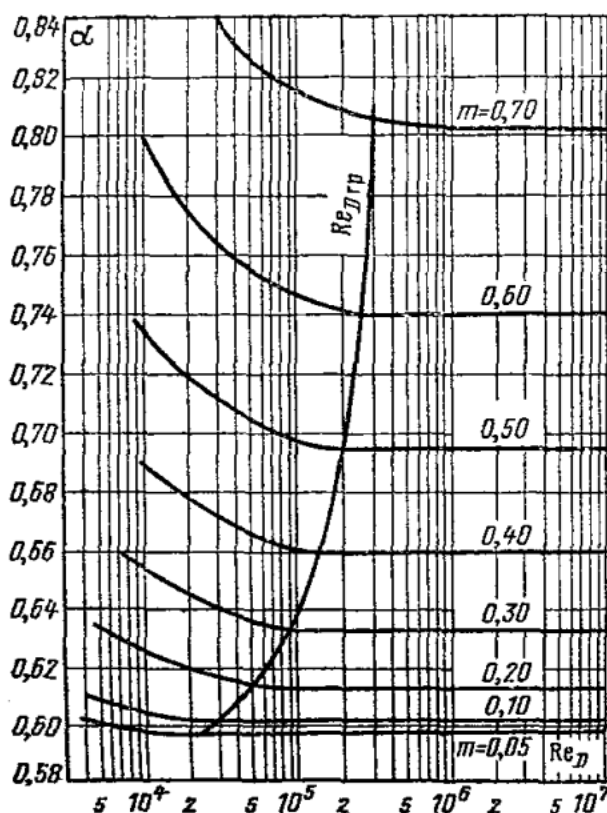


Рис. 4.7 - Зависимость коэффициента расхода стандартных диафрагм от числа Re

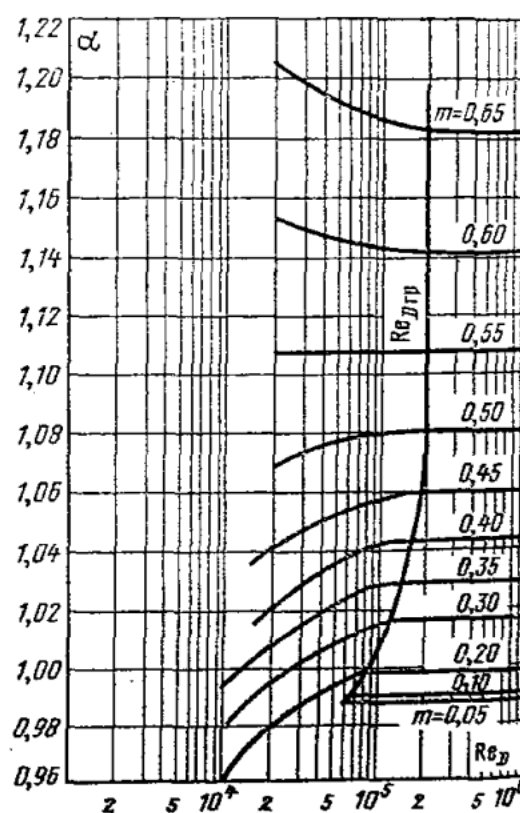


Рис. 4.8 - Зависимость коэффициента расхода стандартных сопел и сопел Вентури от числа Re

Таблица 4.1 - Граничные значения чисел Рейнольдса для сужающих устройств

Модуль m	Значение $Re_{D гр}$		Модуль m	Значение $Re_{D гр}$	
	Диафрагмы	Сопла		Диафрагмы	Сопла
0,05	23000	60000	0,40	134000	165000
0,10	30000	66000	0,45	158000	180000
0,15	42000	75000	0,50	185000	190000
0,20	57000	90000	0,55	210000	196000
0,25	73000	105000	0,60	240000	200000
0,30	90000	125000	0,65	270000	200000
0,35	110000	143000	0,70	300000	200000

Коэффициент расхода, определяемый по положениям, приведенным выше, справедлив только для трубопроводов с достаточно гладкой поверхностью, а для диафрагм необходимо также соблюдение остроты входной кромки отверстия. В противном случае, при измерениях в исходный коэффициент расхода α_0 вводятся поправки на шероховатость $k_{ш}$ и притупление входной кромки $k_{п}$.

Тогда

$$\alpha_0 = \alpha_0 \cdot k_{\text{ш}} \cdot k_n. \quad (4.20)$$

Коэффициент шероховатости определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{ш}} = a \cdot m + b, \quad (4.21)$$

где m – модуль сужающего устройства;

a , b – параметры уравнения;

Определение параметров a , b уравнения (4.21) осуществляется по нижеследующим зависимостям:

$$a = \begin{cases} (D - 0,3) \cdot [-1,066 \cdot D^2 + 0,36 \cdot D - 0,13], & \text{при } D \leq 0,3; \\ 0, & \text{при } D > 0,3; \end{cases}$$
$$b = \begin{cases} 1 + (D - 0,3) \cdot [-0,08 \cdot D^2 + 0,024 \cdot D - 0,0046], & \text{при } D \leq 0,3; \\ 1, & \text{при } D > 0,3; \end{cases}$$

Здесь D – внутренний диаметр трубопровода, м.

Значения же коэффициента k_n , учитывающего притупление входной кромки диафрагмы, может быть определено по эмпирической формуле

$$k_n = a + b \cdot \exp[-n \cdot (m - 0,05)], \quad (4.22)$$

где

$$a = 1 + 0,011 \cdot \exp[-55,2 \cdot (D - 0,05)^{1,3}];$$

$$b = 0,002 + 0,0258 \cdot D - 1,68 \cdot D^2 + 2,867 \cdot D^3;$$

$$n = 4,025 + 142,94 \cdot (D - 0,05)^{1,92};$$

В уравнение расхода (4.15) для сужающих устройств входит также поправочный множитель ε , учитывающий расширение газовой и паровой среды, который вводится из-за того, что у газа или пара, проходящих через сужающее устройство изменяется плотность.

Поправочный множитель ε на расширение измеряемой среды в общем случае может быть описан следующей функциональной зависимостью:

$$\varepsilon = f \left[\left(1 - \frac{\Delta P}{P} \right)^{\frac{1}{k}}, m \right], \quad (4.23)$$

где ΔP – перепад давления на сужающем устройстве;

P – давление среды на входе сужающего устройства;

k - показатель адиабаты;

m – модуль сужающего устройства.

Основным параметром, определяющим значение поправочного множителя ε , является отношение $\Delta P/P$, характеризующее степень изменения плотности среды при прохождении через сужающее устройство. При малых значениях этого отношения $\varepsilon \approx 1$.

Зависимость поправочного множителя ε для стандартных диафрагм от основного параметра и модуля сужающего устройства может быть определена по эмпирической следующей зависимости:

$$\varepsilon_D = 1 - (0,41 + 0,35 \cdot m^2) \cdot \frac{\Delta P}{P \cdot k}, \quad (4.24)$$

а для сопел, сопел и труб Вентури –

$$\varepsilon_C = \left[\frac{(1 - m^2) \cdot \left(\frac{k}{k-1} \right)}{1 - m^2 \cdot \psi^{2/k}} \cdot \psi^{2/k} \cdot \frac{1 - \psi^{\frac{k-1}{k}}}{\frac{\Delta P}{P}} \right]^{0,5}, \quad (4.25)$$

здесь $\psi = 1 - \frac{\Delta P}{P}$, а ΔP и P измеряются в кгс/см² (атм.).

4.2.4. Основные требования к сужающим устройствам

При определении расхода различных сред, в соответствии с нормативным документом РД 50-213-80, для повышения точности измерений выдвигаются определенные требования к условиям проведения измерения, а также к диаметрам сужающих устройств и трубопроводов.

Условия измерения:

- характер движения потока измеряемой среды на прямых участках трубопроводов до и после сужающего устройства должен быть турбулентным и стационарным при этом скорость потока не должна превышать критическую;

- при прохождении потока вещества через сужающее устройство фазовое его состояние не должно меняться;
- течение жидкости должно быть бескавитационным;
- на поверхности сужающего устройства не должно образовываться различных отложений, способных изменить его конструктивные размеры;
- во внутренней полости трубопроводов до и после сужающего устройства не должно скапливаться загрязнений;
- давления на входе и выходе сужающего устройства должны соответствовать соотношению $P_2/P_1 \geq 0,75$ (т.е. потери давления на сужающем устройстве не должны превышать 25%);
- при измерении расхода перегретого пара необходимо пользоваться положениями, касающимися сухого газа;
- допускается определять расход влажного пара как влажного газа, если массовая доля воды в пароводяной смеси не превышает 20%, а отношение плотности пара к плотности жидкости не превышает 0,002.

При измерении расхода с помощью диафрагм может быть использован как угловой, так и фланцевый способ отбора перепада давления, а при использовании различных сопел и труб Вентури – только угловой.

Диафрагмы с угловым способом отбора перепада давления могут применяться на трубопроводах с диаметром $50 \text{ мм} \leq D \leq 1400 \text{ мм}$, при этом их модуль должен находиться в пределах $0,05 \leq m \leq 0,64$.

Диафрагмы с фланцевым способом отбора перепада давления применяются для трубопроводов $50 \text{ мм} \leq D \leq 760 \text{ мм}$ с модулем $0,04 \leq m \leq 0,56$.

В обоих случаях диаметр отверстия диафрагмы d_{20} при 20°C должен быть не менее 12,5 мм.

При измерении расхода с помощью стандартных сопел должны соблюдаться следующие соотношения для их модулей и внутренних диаметров трубопроводов:

для жидких сред - $0,05 \leq m \leq 0,64$, $D \geq 50 \text{ мм}$;

для газов - $0,05 \leq m \leq 0,64$, $D \geq 30 \text{ мм}$

Для сопел Вентури для указанных выше диаметров трубопроводов при измерении жидких и газообразных сред модуль должен быть $0,05 \leq m \leq 0,6$.

Наименьший диаметр отверстия для всех типов сопел d_{20} должен быть не менее 15 мм.

Трубы Вентури могут применяться при измерениях расходов для трубопроводов с диаметром $50 \text{ мм} \leq D \leq 1400 \text{ мм}$, модуль которых составляет $0,1 \leq m \leq 0,6$.

При установке сужающих устройств необходимо также соблюдать ряд требований, несоблюдение которых может привести к недопустимым погрешностям измерений. В местах установки сужающих устройств участки трубопроводов до и после них должны быть прямолинейными, с круглым сечением и длиной, обеспечивающей сглаживание возмущений потока, которые могут образовываться на закруглениях, коленах, запорной арматуре и т.д. При этом необходимо иметь в виду, что искажение потока до сужающего устройства более существенно, чем за ним.

Необходимые наименьшие длины l_1 прямых участков трубопроводов соответствующих диаметров до сужающего устройства в зависимости от конфигурации трубопроводных участков приведены на рис. 4.9.

Задвижки и вентили, установленные до сужающего устройства, особенно открытые не полностью, вызывают значительное возмущение потока. Поэтому сужающее устройство необходимо устанавливать до регулировочной задвижки или вентиля. Если же они будут находиться перед сужающим устройством, то измерение можно считать надежным при условии, что длина участка l_1 будет составлять не менее $100 D_{20}$.

Необходимые наименьшие длины l_2 прямого участка трубопровода за сужающим устройством приведены на рис. 4.10.

Для диафрагм и сопел длина l_2 отчитывается от входного их торца, а для сопла Вентури - от его выходного торца.

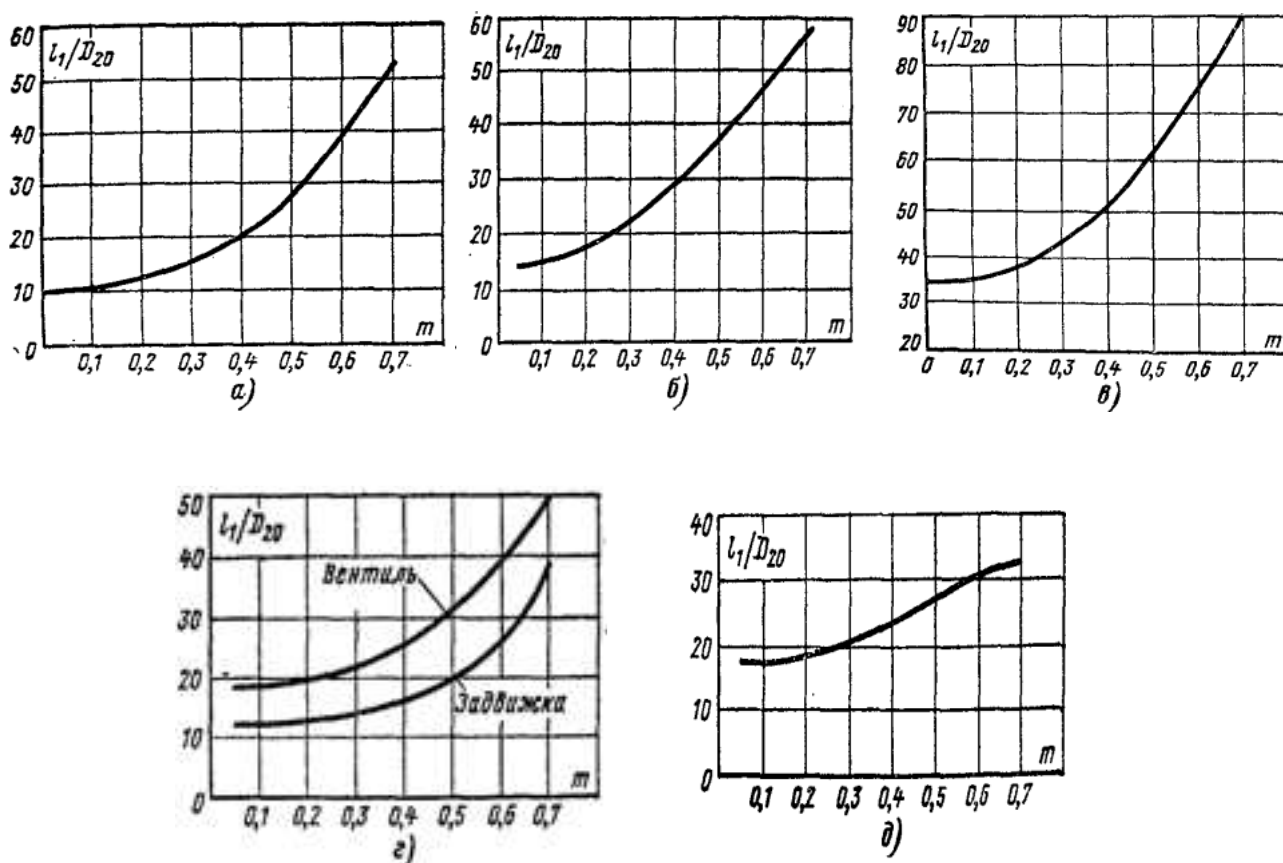


Рис. 4.9 - Необходимые минимальные длины участков трубопроводов до сужающего устройства:
а- колено или тройник; б- группа колен в одной плоскости или разветвляющийся поток; в- группа колен в разных плоскостях или смешивающиеся потоки; г- полностью открытый вентиль или задвижка; д- сходящийся или расходящийся конус (конусность 1:3).

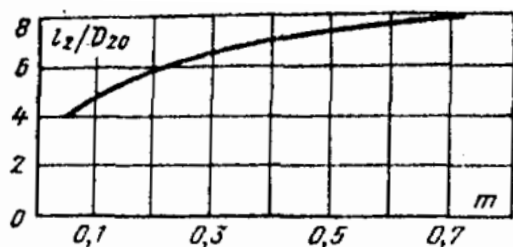


Рис.4.10 - Наименьшие длины участков трубопроводов за сужающими устройствами

Для уменьшения необходимых длин прямых участков трубопроводов обычно применяются различного типа струевыпрямители, например, трубчатые или пластинчатые. При этом длины участков трубопровода до и после сужающих устройств могут быть сокращены вдвое по сравнению с

с указанными выше, но при этом возникает дополнительная погрешность

в измерении расхода до 0,5%.

Если перепад давлений в сужающем устройстве измеряют через кольцевые камеры, то длина l_1 прямого участка трубопровода перед сужающими устройствами может быть сокращена в три раза по сравнению с длинами, указанными на рис. 4.9. В этом случае будет возникать дополнительная погрешность измерения расхода, равная 1%.

Следует указать, что сокращенная длина перед сужающим устройством в любом случае не должна быть менее $6D_{20}$.

4.3. Расходомеры постоянного перепада давления

Расходомеры постоянного перепада давления относятся к средствам измерений, называемыми расходомерами обтекания. Расходомеры обтекания работают на принципе вертикального перемещения чувствительного элемента (тела, свободно перемещающегося в потоке измеряемой среды), выполненного в виде поплавка или поршня, зависящего от расхода среды. При этом одновременно изменяется площадь проходного отверстия расходомера (зазор между чувствительным элементом и внутренней поверхностью мерного участка трубопровода) так, что разность давлений на чувствительный элемент (перепад давления) остается постоянной. Противодействующей силой в этих расходомерах является сила тяжести чувствительного элемента.

К приборам постоянного перепада давления относятся ротаметры, поршневые и поплавковые расходомеры. Ротаметры широко применяются для лабораторных и промышленных измерений небольших объемных расходов однородных потоков чистых или слабозагрязненных жидкостей и газов. Они применяются также в качестве индикаторов расхода среды в газоанализаторах и других приборах.

На рис. 4.11 приведена принципиальная схема ротаметра, который в простейшем виде состоит из вертикальной конусной стеклянной трубки 1, внутри которой находится чувствительный элемент - поплавок 2. Для

обеспечения устойчивой работы поплавок верхний его обод снабжен наклонными каналами, которые при обтекании потоком измеряемой среды приводят его во вращательное движение, тем самым, стабилизируя в центре потока. По вертикальному перемещению поплавок ротаметра вдоль его шкалы, нанесенной на конусной стеклянной трубке, судят об объемном расходе в единицу времени, выражаемому в л/ч или в $\text{м}^3/\text{ч}$. На практике встречаются ротаметры, у которых поплавок не совершает вращательного движения, а корпус их выполнен из металла.

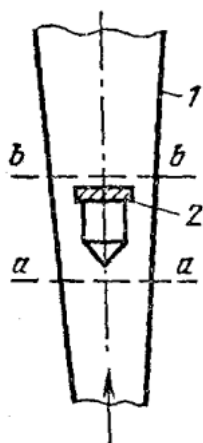


Рис. 4.11 - Схема ротаметра

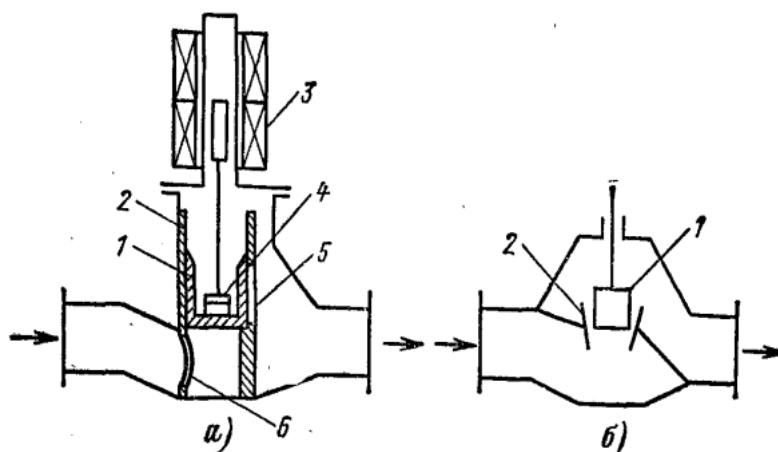


Рис. 4.12 - Схемы поршневого (а) и поплавкового (б) расходомеров

В поршневом расходомере, схема которого приведена на рис. 4.12-а, чувствительным элементом является поршень 1, находящийся во втулке 2. Эта втулка имеет круглое входное отверстие б и прямоугольное выходное отверстие 5. Выходное отверстие является своего рода диафрагмой переменного сечения. Размеры его подбираются в зависимости от пропускной способности расходомера. Сила тяжести поршня регулируется в зависимости от верхнего предела измерения с помощью дополнительных грузов 4. Поршень с помощью штока соединен с сердечником передающего дифференциально-трансформаторного преобразователя 3.

Протекающая через входное отверстие измеряемая среда поступает под поршень и поднимает его. Поршень, перемещаясь вверх, открывает в большей

или меньшей степени отверстие выходной диафрагмы. Жидкость, протекающая через диафрагму, одновременно заполняет пространство над поршнем, которое соединено с каналом за диафрагмой. Прямоугольная форма выходного отверстия обеспечивает линейную зависимость между подъемом поршня и расходом вещества.

Поплавковый расходомер постоянного перепада давления, схема которого приведена на рис. 4.12-б, состоит из чувствительного элемента 1, выполненного в виде поплавка, и конического седла 2, расположенного в корпусе прибора. Конструкция этого расходомера аналогична стеклянным ротаметрам. При этом коническое седло выполняет ту же роль, что и коническая трубка у ротаметра. Различие заключается лишь в том, что длина и диаметр седла примерно равны, в то время как у ротаметра длина конической трубки значительно больше ее диаметра.

4.3.1. Основные положения теории ротаметров

Рассмотрим поплавок, находящийся в конусной трубке (см. рис. 4.11) и обтекаемый снизу вверх потоком набегающей измеряемой среды. При этом поплавок будет подниматься вверх до тех пор, пока площадь кольцевого зазора между ним и стенкой трубы F_k не достигнет величины, при которой силы, действующие на поплавок, не уравниваются. В этом положении высота подъема поплавка будет соответствовать определенному расходу.

Снизу на поплавок действуют сила давления потока $f_d = P'_1 \cdot F_n$ и сила трения потока о поплавок $f_t = k \cdot \hat{w}^n \cdot F_{бп}$, а сверху - сила тяжести поплавка $G = V_n \cdot \rho_n \cdot g$ и сила давления потока, находящегося над поплавком $f'_d = P'_2 \cdot F_n$. Здесь P'_1 и P'_2 – среднее давление потока на нижнюю и верхнюю поверхности, соответственно; F_n – площадь наибольшего поперечного сечения поплавка; k – коэффициент поверхностного сопротивления поплавка; \hat{w} – средняя скорость потока в свободном сечении F_k . $F_{бп}$ – площадь боковой поверхности поплавка; n – показатель, зависящий от скорости потока; V_n и ρ_n – объем и плотность материала поплавка, соответственно.

Исходя из этого, условие равновесия поплавка выразится уравнением

$$P'_1 \cdot F_{\Pi} + k \cdot \hat{w} \cdot F_{\text{бл}} = P'_2 \cdot F_{\Pi} + V_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi} \cdot g, \quad (4.26)$$

отсюда получаем разность средних давлений:

$$P'_1 - P'_2 = \frac{1}{F_{\Pi}} \cdot (V_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi} \cdot g - k \cdot \hat{w} \cdot F_{\text{бл}}). \quad (4.27)$$

Исходя из того, что площадь кольцевого зазора меняется в зависимости от расхода среды, разность давлений $P'_1 - P'_2$ будет оставаться постоянной для любого расхода. Это дает основание отнести ротаметр к расходомерам постоянного перепада давления.

Однако, разность статических давлений $P_1 - P_2$, действующих на поплавки, не является постоянной. Здесь оказывает влияние сила, возникающая от динамического давления потока, определяемая по выражению:

$$f_{\text{д}} = \varphi \cdot F_{\Pi} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}, \quad (4.28)$$

где φ – коэффициент сопротивления поплавка, зависящий от его формы;

ρ , w – плотность и скорость измеряемой среды.

Принимая во внимание выражения (4.27) и (4.28), получаем

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{F_{\Pi}} \cdot (V_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi} \cdot g - k \cdot \hat{w} \cdot F_{\text{бл}} - \varphi \cdot F_{\Pi} \cdot \frac{\rho \cdot w^2}{2}). \quad (4.29)$$

Из этого уравнения следует, что с увеличением скорости потока (следовательно и расхода) перепад давления $P_1 - P_2$ на поплавке будет уменьшаться, а полный же перепад давления на ротаметре будет увеличиваться, что обусловлено ростом потерь давления.

Для получения уравнения ротаметра воспользуемся уравнением Бернулли для сечений $a-a$ и $b-b$ (см. рис. 4.11).

$$\frac{P_a}{\rho \cdot g} + \frac{k_a \cdot w_a^2}{2 \cdot g} + h_a = \frac{P_b}{\rho \cdot g} + \frac{k_b \cdot w_b^2}{2 \cdot g} + h_b + \xi \cdot \frac{w_b^2}{2 \cdot g}, \quad (4.30)$$

где P_a, P_b – средние давления в соответствующих сечениях;

w_a, w_b – средние скорости в соответствующих сечениях;

h_a, h_b –подъема поплавка при скоростях потока в сечениях $a-a$ и $b-b$;

ξ – коэффициент потерь энергии на участке между сечениями $a-a$ и $b-b$;

k_a, k_b – коэффициенты неравномерности скоростей в сечениях $a-a$ и $b-b$.

Из условия неразрывности струи следует, что

$$Q_o = w_a \cdot F_a = w_b \cdot F_b = w_b \cdot \mu \cdot F_k, \quad (4.31)$$

где Q_o – объемный расход несжимаемой жидкости;

$\mu = F_b/F_k$ – коэффициент сужения струи.

Принимая во внимание условие неразрывности струи, из уравнения (4.30) получаем

$$\frac{2 \cdot (P_a - P_b)}{\rho} - 2 \cdot g \cdot \Delta h = \frac{Q_o^2}{\psi \cdot \mu^2 \cdot F_k^2} \cdot \left[k_b + \xi - k_a \cdot \mu^2 \cdot \left(\frac{F_k}{F_a} \right)^2 \right], \quad (4.32)$$

где $\psi = \frac{P_a - P_b}{P_1 - P_2}$; $\Delta h = h_b - h_a$.

Подставляя в это уравнение значение $P_1 - P_2$ из (4.29), определяем объемный расход, измеряемый ротаметром:

$$Q_o = \alpha \cdot F_k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot V_{II} \cdot (\rho_{II} - \rho)}{\rho \cdot F_{II}}}, \quad (4.33)$$

где α – коэффициент расхода, зависящий от формы и геометрических размеров поплавка, определяемый экспериментальным путем.

Для экспериментальной градуировки ротаметров, применяемых для жидкостей и газов, используют либо воду, либо воздух. Ко всем ротаметрам, используемых для эксплуатации в промышленных условиях, в инструкциях по эксплуатации должна приводиться методика пересчета показаний ротаметра на измеряемую среду с учетом ее плотности и вязкости.

4.3.2. Устройство ротаметров

Ротаметры, применяемые для измерения объемного расхода жидкостей и газов, имеют несколько разновидностей. В зависимости от величины измеряемого расхода в ротаметрах используются поплавки различного веса.

Ротаметры, применяемые для местного измерения расхода, изготавливаются со стеклянной конусной трубкой в виде показывающих

приборов. Ротаметры, имеющие металлический корпус, снабжаются передающими измерительными преобразователями с электрическим или пневматическим выходным сигналом. Эти ротаметры работают в комплекте с соответствующими вторичными приборами. Ротаметры с металлическим

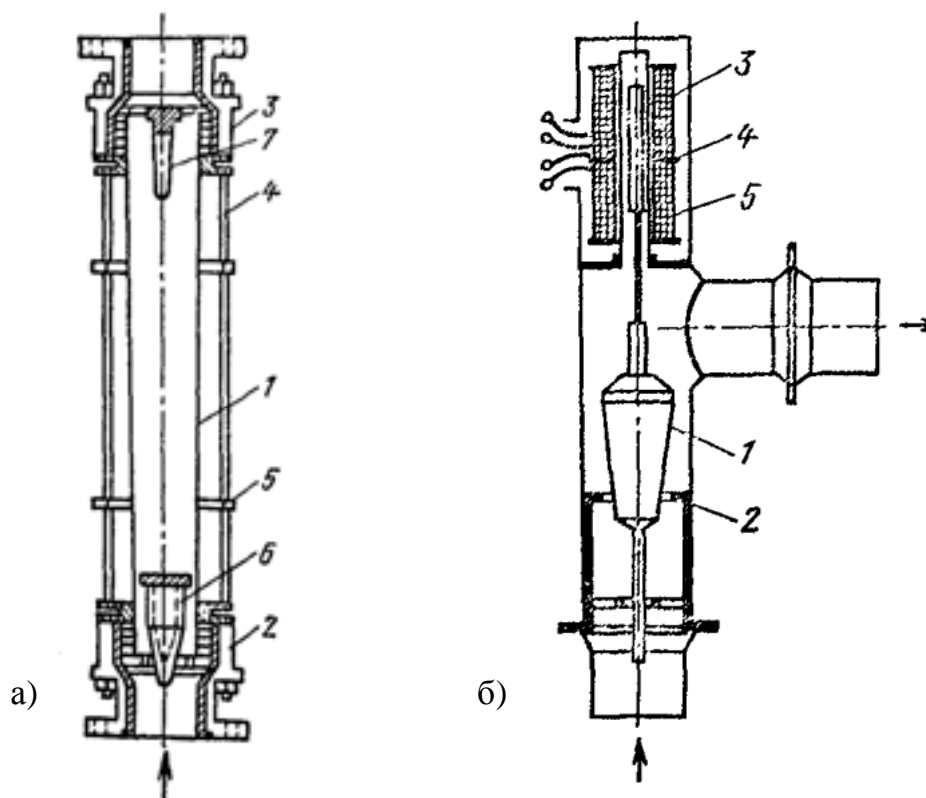


Рис. 4.13 - Устройство промышленных ротаметров:
а - со стеклянной трубкой; б - с устройством передачи сигнала

корпусом близки по своему устройству к поплавковым расходомерам.

Ротаметры указанных разновидностей выпускаются классов точности: 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

На рис. 4.13-а показано устройство ротаметра со стеклянной конусной трубкой.

Стеклянная трубка 1 зажата в патрубках 2 и 3, которые снабжены сальниками. Оба патрубка между собой связаны тягами 4 с надетыми на них ребрами 5, что придает прибору необходимую прочность. Внутри патрубка 2 находится седло, на которое опускается поплавок 6 при нулевом расходе

измеряемой среды. Верхний патрубок 3 снабжен ограничителем хода поплавка 7. Шкала наносится непосредственно на внешней поверхности стеклянной конусной трубки. Указателем у ротаметров со стеклянной трубой служит верхняя горизонтальная плоскость поплавка. Эти ротаметры применяются для измерения расхода газов или прозрачных жидкостей, находящихся под избыточным давлением не более 0,6 МПа.

Ротаметры, снабженные передающими преобразователями с электрическим выходным сигналом, показаны на рис. 4.13-б. Этот ротаметр имеет конический поплавок 1, который перемещается внутри кольцевой диафрагмы 2 под действием проходящего снизу вверх потока жидкости. При подъеме поплавка проходное отверстие между рабочей поверхностью поплавка и внутренней кромкой диафрагмы увеличивается пропорционально изменению расхода среды.

Поплавок ротаметра жестко связан с сердечником 3 передающего дифференциально-трансформаторного преобразователя 4. Катушка дифференциально-трансформаторного преобразователя надета на разделительную трубку 5, изготовленную из немагнитной стали.

Ротаметры, выполняемые по данной схеме в комплекте со вторичными приборами типа КСД и др., имеют класс точности не менее 2,5. Они выпускаются для измерения расхода среды, находящейся под рабочим избыточным давлением до 1,6 и 6,4 МПа. Ротаметры могут быть изготовлены и на большее рабочее избыточное давление. Кроме этого, предусматривается выполнение ротаметров с унифицированным выходным сигналом постоянного тока 0 - 5 мА.

Ротаметры с унифицированным пневматическим выходным сигналом 0,02 - 0,1 МПа отличаются от рассмотренных приборов (рис. 4.13-б) наличием пневматического преобразователя. Для преобразования перемещения поплавка ротаметра в пневматический выходной сигнал применяют передающие пневматические преобразователи с силовой компенсацией типа, принцип действия которых был рассмотрен выше.

4.4. Тахометрические расходомеры и счетчики

К тахометрическим расходомерам относятся измерительные приборы, в основу работы которых заложено вращение чувствительного элемента, вызываемое потоком измеряемой среды. При этом скорость вращения чувствительного элемента пропорциональна измеряемому объемному расходу. На базе этих приборов строятся счетчики жидких и газообразных сред.

По принципу действия выпускаемые тахометрические счетчики количества разделяются на скоростные и объемные. В скоростных счетчиках в качестве рабочего элемента в основном применяют турбины (вертушки) с вертикально и горизонтально расположенными осями вращения. У счетчиков с вертикальной осью вращения турбины поток измеряемой среды направлен по касательной к окружности, описываемой средним радиусом турбины. Такие крыльчатые турбины называют тангенциальными. У счетчиков же с горизонтальной осью турбины поток направлен параллельно оси вертушки. Такие турбины называют аксиальными. В скоростных расходомерах и счетчиках угловая скорость вертушки пропорциональна средней скорости потока измеряемой среды, а следовательно, и объемному расходу. Число оборотов вертушки прибора суммируется счетным механизмом, а количество вещества, прошедшего через счетчик в единицах объема указывается счетным указателем.

Объемные тахометрические счетчики обладают более высокой точностью по сравнению со скоростными. В объемных счетчиках протекающая через него среда измеряется отдельными, равными по объему дозами, отсекаемыми одним или несколькими рабочими элементами. Число пропущенных доз измеряемой среды суммируется счетным механизмом, а суммарное количество вещества, прошедшее через прибор за определенный промежуток времени, показывается счетным указателем.

Счетчики количества обычно характеризуются следующими техническими данными:

- калибром - размером диаметра условного прохода входного патрубка, выраженного в миллиметрах;
- пределами допускаемой основной погрешности показаний, выраженной в процентах от действительного количества вещества, протекшего через прибор;
- потерей давления, вызываемой прибором;
- начальным, номинальным и верхним пределами измерений;
- порогом чувствительности;
- емкостью счетчика - наибольшим значением количества вещества, на которое рассчитан счетный механизм прибора;
- предельным допускаемым избыточным давлением и предельной температурой измеряемой среды.

Погрешность показаний рассматриваемых счетчиков зависит от вязкости и расхода среды и определяется экспериментальным путем при различных расходах. Необходимо также иметь в виду, что потеря давления, вызываемая счетчиком, растет с увеличением расхода и вязкости измеряемой среды. В связи с этим потеря давления является критерием пропускной способности счетчика.

Под нижним пределом измерений счетчика понимают наименьший расход, при котором погрешность показаний прибора не превышает допускаемую. Номинальным расходом счетчика называют наибольший длительный расход, при котором погрешность показаний прибора не выходит за пределы допускаемой. Под верхним пределом измерения счетчика понимают максимальный расход, допускаемый в течение одного часа в сутки.

При выборе счетчика необходимо иметь в виду, что калибр его может быть взят меньше диаметра трубопровода, тогда в трубопроводе до и после счетчика необходимо устанавливать конические переходы.

Скоростные счетчики количества жидкости. В этих счетчиках, используются тангенциальные или аксиальные турбины. Применяются они в основном для измерения суммарного количества воды в горизонтальных трубопроводах с верхним диапазоном измерения от 0,15 до 12,5 м³/ч. Счетчики этого вида в зависимости от того, находится ли его счетный механизм непосредственно в воде или изолирован от нее, делятся на так называемые «мокроходы» и «сухоходы». Мокроходы имеют ряд преимуществ перед сухоходами (меньше деталей, отсутствие уплотнений и т.д.), но их нормальная работа возможна только на чистой воде. Поэтому наибольшее распространение получили счетчики- сухоходы.

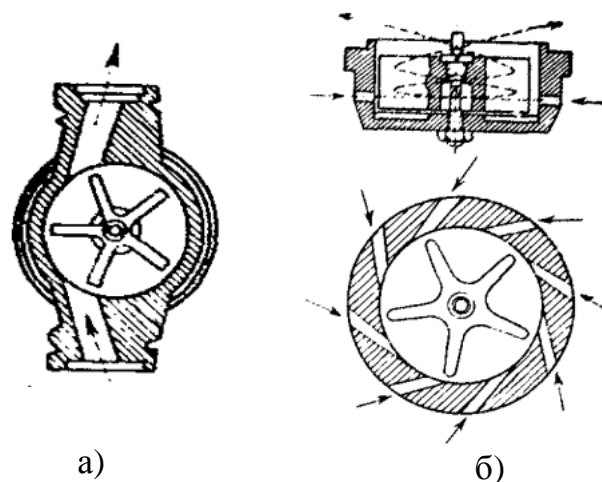


Рис. 4.14 - Тангенциальные турбины:
а - одноструйная; б - многоструйная

В зависимости от способа подведения воды к лопастям вертушки счетчика они разделяются на одноструйные и многоструйные. В одноструйных и в многоструйных счетчиках вода к лопастям вертушки подводится тангенциально. В одноструйных счетчиках (см. рис. 4.14-а) жидкость подается в камеру, где расположена вертушка и отводится оттуда на одном уровне, что исключает образование застойных зон, уменьшает потери давления и возможность оседания твердых взвешенных в воде частиц.

Корпус одноструйного счетчика снабжен коническими патрубками на входе и выходе. В широкой части входного патрубка устанавливается фильтр в виде металлической сетки, после которой находится стабилизатор потока, представляющий собой пластинчатый струевыпрямитель. Ось турбины прибора соединяется с зубчатым передаточным механизмом, который приводит в действие декадное счетное устройство, снабженное циферблатом с одной большой и несколькими маленькими шкалами. На большой шкале имеются 100 делений с ценой деления $0,001 \text{ м}^3$. Малые шкалы имеют по десять делений. Цена деления первой малой шкалы $0,1 \text{ м}^3$, второй – $1,0 \text{ м}^3$, третьей – $10,0 \text{ м}^3$ и т.д. Счетный механизм счетчика отделен от его проточной части герметичной перегородкой и сальниковыми уплотнениями.

В многоструйном счетчике (см. рис. 4.14-б) жидкость поступает в нижнюю часть проточной камеры и несколькими струями подается на лопасти крыльчатки. Приведя крыльчатку во вращение, жидкость далее поднимается через осевой раструб в верхнюю часть проточной камеры и далее в выходной патрубок. В этих счетчиках вращение крыльчатки передается на счетный механизм аналогично, как и у одноструйного счетчика.

Счетчики с тангенциальными турбинами выпускаются калибром от 20 до 50 мм и рассчитаны на рабочее давление среды до 1,0 МПа. Они применяются в системах коммунального водо- и теплоснабжения, а также в системах промышленных водопроводов, например счетчики типа ВСКМ и УВКГ-32. Приборы типа ВСКМ используются в трубопроводах с температурой воды $5 - 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, у них обычно применяют крыльчатку, выполненную из пластмассы. Приборы же типа УВКГ-32 используют в теплотрассах с температурой воды до $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и снабжены металлической крыльчаткой.

На рис. 4.15 приведена конструкция одноструйного водомера-сухохода.

Скоростные расходомеры с аксиальной турбиной (спиральной вертушкой) применяются для учета больших количеств жидких сред. Они могут быть установлены не только на горизонтальных участках трубопроводов, но и на наклонных и вертикальных с восходящим потоком жидкости. В этих

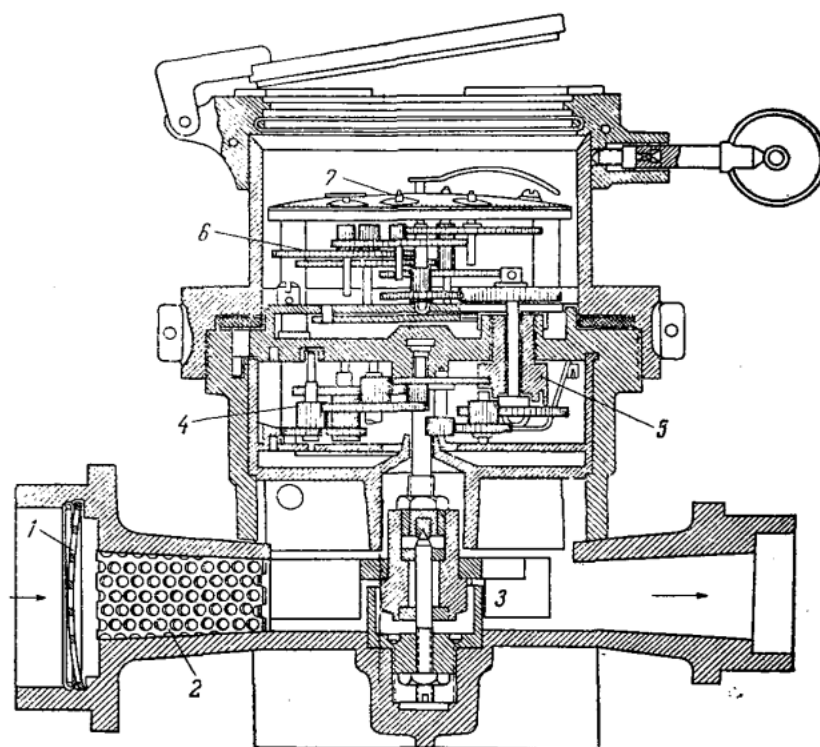


Рис. 4.15 - Расходомер с вертикальной крыльчаткой вертушкой:
 1- сетка; 2 - струевыпрямитель; 3 - крыльчатка; 4- редуктор;
 5 - сальниковое уплотнение; 6 - счетный механизм; 7 - циферблат.

приборах жидкость, протекающая через него, вращает турбину, которая представляет многоходовой винт с большим шагом. Число оборотов турбины, пропорциональное скорости потока и обратно пропорциональное шагу лопасти, определяется в соответствии с выражением:

$$n = k \cdot \frac{V_{\text{ср}}}{l}, \quad (4.34)$$

где n – число оборотов турбины, с^{-1} ;

l – шаг лопастей, м;

k – постоянная данного расходомера;

$V_{\text{ср}}$ – средняя скорость потока.

Выражая значение средней скорости потока через объемный его расход Q_0 и площадь живого сечения прибора F из уравнения (4.34), получим

$$n = k \cdot \frac{Q_o}{F \cdot l} \quad (4.35)$$

Для обеспечения постоянства метрологических характеристик прибора необходимо, чтобы направление потока жидкости было параллельно оси турбины, т.к. незначительные отклонения в движении потока влияют на число ее оборотов. Для стабилизации направления потока перед турбиной со стороны входа потока жидкости устанавливают струевыпрямитель. Кроме того, необходимо, чтобы перед прибором был прямой участок трубы длиной не менее $(8-10)D$, а после него - не менее $5 D$, где D - диаметр трубопровода.

На рис. 4.16 приведена схема расходомера с аксиальной турбиной.

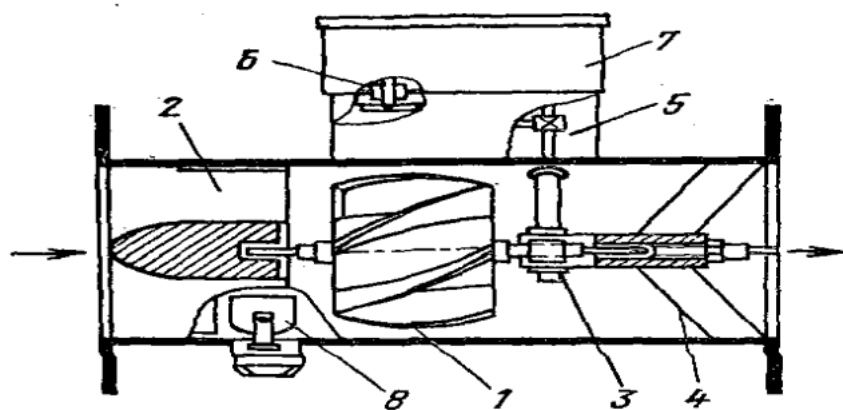


Рис. 4.16 - Схема расходомера с аксиальной турбиной:

- 1 - винтовая вертушка; 2 - струевыпрямитель;
- 3 - червячная передача; 4 - кронштейн;
- 5 - редуктор; 6 - ось с сальником; 7 - счетный механизм; 8 - регулятор скорости вращения

Как видно из рисунка, винтовая вертушка расходомера связана посредством червячной передачи и вала с передаточным механизмом (редуктором), а последний, в свою очередь, через передаточную ось с сальниковым уплотнением соединен со счетным механизмом. Для изменения угловой скорости вертушки счетчика при его градуировке служит пластина-регулятор, которая является продолжением укороченной радиальной перегородки струевыпрямителя. Аксиальная турбина является важнейшим элементом прибора и поэтому должна быть тщательно сбалансирована при

установке. Удельный вес ее необходимо подбирать близким к удельному весу измеряемой среды. В связи с этим турбину изготавливают с полый центральной частью.

Выпускаемые турбинные водомеры типов ВТ, ВТГ, СТВ и СТВГ используются в системах коммунального и промышленного водоснабжения, а также в системах теплоснабжения. Эти водосчетчики изготавливаются калибром 50, 80, 100, 150, 200, 250 и 300 мм и рассчитаны на измерение расходов от 2,5 до 350 м³/ч при максимальном рабочем давлении до 1,5 МПа. Пределы допускаемой основной погрешности показаний водосчетчиков этого типа при измерении в диапазоне от нижнего предела до номинального расхода составляют не более $\pm 2\%$.

Объемные счетчики количества жидкостей. К их числу относятся счетчики количества жидкости – поршневые, дисковые, ротационные, с овальными шестернями и др.

Для ознакомления с принципом действия этих счетчиков рассмотрим упрощенную схему поршневого счетчика с вращающимся затвором, схема которого приведена на рис. 4.17.

Жидкость из трубы 1 через распределительный четырехходовой кран 2 поступает под поршень 3 и поднимает его. Поршень, перемещаясь вверх, вытесняет жидкость, находящуюся в верхней полости цилиндра, через распределительный кран в трубу 4. Когда поршень достигнет верхнего крайнего положения, затвор четырехходового крана, связанный специальным механизмом 5 со

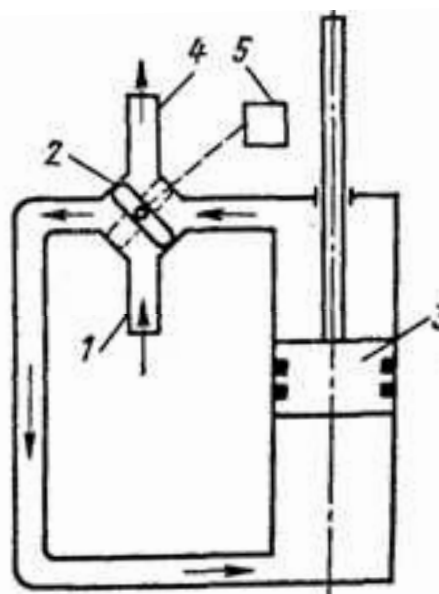


Рис. 4.17 -Схема однопоршневого счетчика жидкости

штоком поршня, повернется на угол 90°. Благодаря этому жидкость из трубы 1

будет поступать в верхнюю полость цилиндра, поршень начинает перемещаться вниз и из нижней полости жидкость вытесняется через четырехходовой кран и трубу 4. После достижения поршнем крайнего положения цикл повторяется.

Количество жидкости, прошедшее через счетчик за определенный промежуток времени, определяется по счетному механизму, связанному с помощью передаточного механизма со штоком поршня по количеству порций жидкости, вытесненной поршнем.

Для поршневых счетчиков по сравнению с другими типами объемных счетчиков характерна большая потеря давления. Поршневые счётчики используются для измерения суммарного количества нефтепродуктов и других жидкостей.

В промышленности широко применяют четырехпоршневые счетчики типа МП и СМ. Эти приборы могут быть показывающими или с дистанционной передачей сигнала при наличии частотных струнных преобразователей или преобразователей ферродинамической системы.

Приборы этого типа выпускаются с верхними пределами измерения от 50 до 4000 л/ч. Рабочее давление измеряемой среды должно быть не более 1,6 МПа, а температура от 10 до 100° С. Наибольшая потеря давления для счетчика-мазотомера не превышает 0,035 МПа.

Пределы допускаемой основной погрешности суммирования составляют $\pm 1\%$. Пределы допускаемой основной погрешности по шкале расхода составляют: $\pm 1,5\%$ для преобразователя; $\pm 2,5\%$ для вторичного прибора.

Шариковые расходомеры. Расходомеры этого типа относятся также к тахометрическим расходомерам. Чувствительным элементом у них является шарик, вращающийся в одной плоскости по внутренней поверхности трубы под воздействием предварительно закрученного потока измеряемой среды. Эти расходомеры состоят из первичного шарикового преобразователя расхода и нормирующего преобразователя. Преимуществом шариковых расходомеров является их нечувствительность к твердым включениям в измеряемой среде, а

также к ударам и вибрациям, они отличаются простотой конструкции и позволяют измерять пульсирующие расходы с амплитудой пульсации, достигающей до максимального измеряемого расхода.

Схема устройства первичного шарикового преобразователя расхода приведена на рис. 4.18. Корпус шарикового преобразователя расхода выполнен

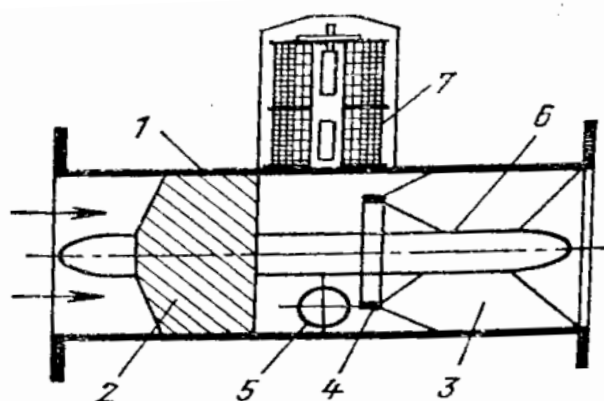


Рис. 4.18 - Первичный преобразователь шарикового расходомера жидкости

аналогично с корпусом турбинного преобразователя. Внутри корпуса шарикового преобразователя 1 расположен сборный узел, состоящий из струенаправляющего устройства 2, выполненного в виде многозаходного винта, и струевыпрямителя 3. На крестовине струевыпрямителя находится ограничительное кольцо 4. В пространстве между этим кольцом

и струенаправляющим устройством находится шарик 5 из ферромагнитного материала, который может свободно вращаться вокруг ступицы 6. На корпусе шарикового преобразователя установлен передающий преобразователь 7 дифференциально-трансформаторного типа.

Помимо указанного преобразователя расхода применяется также первичный шариковый преобразователь расхода с тангенциальным подводом измеряемой жидкости.

В первичных скоростных тахометрических преобразователях расхода жидкость, протекающая через него, приводит во вращение шарик, частота вращения которого пропорциональна средней скорости потока измеряемой жидкости в данном сечении преобразователя, а, следовательно, и объемному расходу. Установленный с наружной стороны корпуса первичного тахометрического преобразователя расхода бесконтактный передающий

преобразователь формирует электрические импульсы, частота следования которых зависит от частоты вращения шарика.

Наиболее широкое распространение получили два типа бесконтактных передающих преобразователей – магнитоэлектрический и дифференциально-трансформаторный. Магнитоэлектрический передающий преобразователь используется в первичных тахометрических преобразователях, имеющих большие диаметры условного прохода.

Передающий магнитоэлектрический преобразователь состоит из постоянного магнита, на котором намотана катушка. Прохождение шарика около торца магнита приводит к появлению электрического импульса в цепи катушки.

Передающие дифференциально-трансформаторные преобразователи применяются в выпускаемых первичных шариковых и турбинных преобразователях расхода с диаметрами условного прохода до 200 мм.

Импульсный сигнал от передающего преобразователя расходомера обычно преобразуется в унифицированный выходной сигнал постоянного тока 0-5 мА, а в качестве вторичных показывающих и регистрирующих приборов могут быть использованы миллиамперметры типа КСУ, КПУ или другие миллиамперметры ГСП.

К выпускаемым шариковым расходомерам относятся расходомеры типа ШРТ, «Сатурн», ШИР и ДРШС. Диапазон измерения этих приборов в зависимости от типа лежит от 0,025 до 400 м³/ч при давлении контролируемой среды 2,5 и 6,4 МПа. Класс точности расходомеров составляет 1,5% для диапазона измерений 30-100% и 2,5% - в диапазоне измерений до 30%.

Аналогичный принцип действия и конструкцию имеют тахометрические и объемные расходомеры и счетчики газа. Выпускаемые газовые расходомеры-счетчики в основном предназначены для измерения объемного расхода и объемного количества природного газа, воздуха и инертных газов плотностью не менее 0,7 кг/м³ при температуре 0-50 °С. Характеризуются такие приборы таким показателем, как G- рейтинг, значение которого соответствует

номинальному расходу. Различают следующие базовые значения G- рейтинга: 1; 1,6; 2,5; 4; 6 и 10. Величина же G- рейтинга для газовых счетчиков должна соответствовать следующему ряду:

$$G = (1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10) \cdot 10^n,$$

где $n = 0, 1, 10$ и т.д.

Максимальная допустимая величина расхода газа, определяемая G-рейтингом, соответствует значению последующего G-рейтинга, приведенного выше ряда. Например, счетчик газа с рейтингом G4 предназначен для измерения номинального расхода $4 \text{ м}^3/\text{ч}$ (при этом $n = 0$), а максимальное же значение расхода для этого прибора составляет $6 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В настоящее время выпускается большая номенклатура различных расходомеров-счетчиков газа турбинного, ротационного и мембранного типов, которые используются как с корректорами (для коммерческого учета), так и без них. Корректоры, применяемые в этих приборах, предназначены для автоматического введения поправки на измерения расхода по температуре, давлению и составу измеряемой среды. Основная допустимая погрешность для счетчиков газа составляет 1,0 - 1,5% в диапазоне измерений $0,3Q_{\max} - Q_{\max}$ и 2,5 - 3,0% в диапазоне измерений $Q_{\min} - 0,3Q_{\max}$.

4.5. Электромагнитные расходомеры

В основу работы электромагнитных расходомеров положен закон электромагнитной индукции, согласно которому в жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется э.д.с., пропорциональная скорости движения жидкости. Выпускаются расходомеры с электромагнитным преобразователем расхода и с электромагнитным преобразователем скорости потока. Процессы, протекающие в них, имеют одинаковую физическую основу.

Электромагнитные расходомеры могут применяться для измерения больших расходов жидкости, их показания не зависят от параметров контролируемой среды (вязкости, температуры, химического состава,

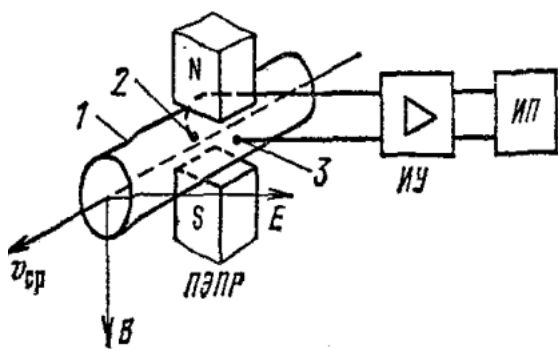


Рис. 4.19 - Схема электромагнитного расходомера с постоянным магнитным полем.

плотности), они обладают высоким быстродействием, имеют линейную шкалу и значительный диапазон измерения. С помощью этих приборов можно измерять расход агрессивных, абразивных и вязких жидкостей и пульп.

Преобразователи электромагнитных расходомеров не имеют движущихся элементов и сужений. В этих расходомерах может использоваться как постоянное, так и переменное магнитное поле.

Приборы применяют для измерения расхода жидкостей с удельной электропроводностью не менее 10^{-3} См/м, что соответствует электропроводности воды из водопроводной сети. Верхний предел удельной электрической проводимости 10 См/м.

К недостаткам электромагнитных расходомеров можно отнести низкую помехозащищенность от электрического оборудования, работающего на токах промышленной частоты (для расходомеров с переменным магнитным полем), поляризацию электродов (для расходомеров с постоянным магнитным полем). Кроме того, эти расходомеры нельзя использовать для газов и жидкостей с малой электропроводностью (масла, бензин и другие нефтепродукты).

Принципиальная схема электромагнитного расходомера с постоянным магнитным полем показана на рис. 4.19.

Принцип действия этого расходомера основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым наведенная в проводнике э.д.с. пропорциональна скорости его движения в магнитном поле. Роль движущегося в магнитном поле проводника играет электропроводная жидкость, протекающая через первичный электромагнитный преобразователь расхода (ПЭПР), установленный на трубопроводе.

Прибор, кроме первичного электромагнитного преобразователя, включает в себя также электронный измерительный усилитель ИУ и вторичный измерительный прибор ИП. Корпус преобразователя расхода представляет собой отрезок трубы 1 из немагнитного материала с двумя фланцами для включения его в разрыв трубопровода. На внешней стороне корпуса преобразователя установлен постоянный магнит N-S, магнитные силовые линии которого перпендикулярны вектору скорости движения жидкости. Для съема выходного сигнала преобразователя расхода служат электроды 2 и 3, проходящие через стенку трубы в измеряемую среду.

Материал трубы в месте установки электромагнитного преобразователя выполняется из диэлектрического материала либо из немагнитной нержавеющей стали, покрытой со стороны жидкости диэлектриком. В этом случае электроды для съема э.д.с. изолируются от металлической трубы.

В случае, если вектор средней скорости V_{cp} перпендикулярен силовым магнитным линиям, то

выходная э.д.с. (E) расходомера определится в соответствии с выражениями:

$$E = V_{cp} \cdot D \cdot B \quad \text{или} \quad E = \frac{4 \cdot Q_o \cdot B}{\pi \cdot D}, \quad (4.36)$$

где D – диаметр трубопровода (расстояние между электродами), м;

B – магнитная индукция, Т;

Q_o – объемный расход, м³/с.

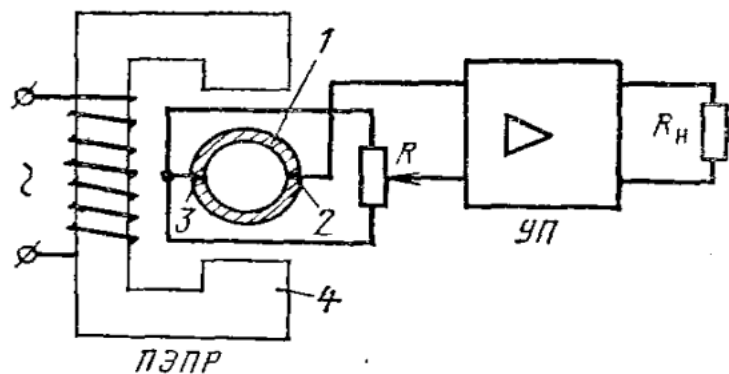


Рис. 4.20 - Электромагнитный расходомер с переменным магнитным полем

Электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем применяются в основном в лабораторных условиях и при проведении

исследовательских работ, т.к. поляризация электродов, характерная для приборов такого типа, создает значительные неудобства при эксплуатации их в промышленных условиях.

В промышленных условиях нашли применение расходомеры с переменным магнитным полем. Принципиальная схема такого расходомера приведена на рис. 4.20.

На приведенном рисунке приняты следующие обозначения: ПЭПР-первичный электромагнитный преобразователь расхода с переменным магнитным полем, создаваемым электрическим магнитом 4; УП-промежуточный усилитель, преобразующий выходной сигнал ПЭПР в унифицированный сигнал постоянного тока 0-5 мА; R_n - сопротивление внешней нагрузки (вторичный прибор, интегратор, входное устройство информационно-вычислительной машины и т.д.). Требования, предъявляемые к материалам для изготовления трубы 1 и электродов 2 и 3 преобразователя аналогичны перечисленным для прибора с постоянным магнитным полем. Длину трубы 1 выбирают в зависимости от ее диаметра с таким расчетом, чтобы обеспечить симметричность профиля скоростей потока относительно оси трубы преобразователя расхода. Для серийно выпускаемых преобразователей расхода материалом трубы и электродов служит нержавеющая сталь Х18Н9Т. Для изоляции внутренней поверхности трубы применяют синтетический каучук (до 40 °С), обыкновенную резину (до 80 °С), фторопласт и кислотостойкую эмаль (для агрессивных сред с температурой до 150 °С).

В настоящее время в промышленности применяются электромагнитные расходомеры типов ИР-61, 4РИМ, «Индукция-51» и др. с диаметрами условных проходов от 10 до 800 мм. Верхние пределы измеряемых ими расходов составляют 0,3 – 5000 м³/ч при предельных скоростях потоков измеряемой среды от 1,25 до 10,0 м/с. Указанные типы расходомеров имеют классы точности 1,0; 1,5; и 2,0.

4.6. Ультразвуковые расходомеры

Действие ультразвуковых расходомеров основано на принципе использования эффекта Доплера, который заключается в изменении скорости распространения ультразвукового сигнала в движущейся среде в зависимости от величины составляющей скорости этой среды в направлении распространения ультразвукового сигнала.

Ультразвуковые расходомеры отличаются высоким быстродействием, помехоустойчивостью, высокой точностью и большим диапазоном измерения.

Рассмотрим структуру и принцип работы расходомеров такого типа на примере ультразвукового расходомера УЗР-В, который предназначен для измерения объемного расхода жидкостей на частоте 1 МГц с коэффициентом затухания акустических волн не более 7 дБ/м.

На рис. 4.21 приведена структурная схема ультразвукового расходомера типа УЗР-В. В комплект расходомера входят измерительно-управляющий прибор и два пьезодатчика. Первичным преобразователем ультразвукового расходомера является отрезок трубы, на котором под углом α к ее оси установлены пьезоэлектрические датчики. При сжатии и растяжении в определенных направлениях пьезоэлементов на их поверхностях возникают электрические заряды. Если к этим поверхностям приложить разность электрических потенциалов, то пьезоэлемент растянется или сожмется в зависимости от того, на какой из этих поверхностей будет больше напряжения.

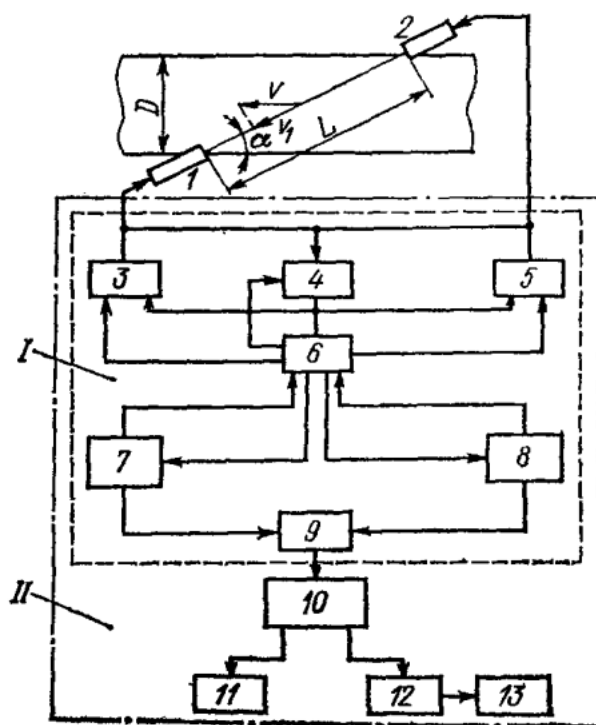


Рис. 4.21 - Структурная схема ультразвукового расходомера

Это явление называется обратным пьезоэффектом, которое и лежит в основе работы излучателей ультразвуковых колебаний, преобразующих переменное электрическое поле в механические колебания той же частоты. Приемники же, преобразующие эти колебания в переменное электрическое напряжение, работают на прямом пьезоэффекте. Каждый из двух пьезоэлементов по очереди является излучающим и приемным. Они с помощью высокочастотных кабелей соединяются с измерительным управляющим прибором.

Основным функциональным узлом измерительного управляющего прибора II является субпанель измерения I, которая содержит два синхрокольца. Импульс с выхода формирователя запускающих импульсов 3 поступает на пьезоэлектрический первичный преобразователь 1, который излучает короткий ультразвуковой сигнал. Этот сигнал проходит через контролируемую среду и принимается пьезоэлектрическим датчиком 2 через время, зависящее от расстояния между датчиками L и разности $C-V_1$. Здесь C - скорость ультразвука в измеряемой среде, V_1 - проекция вектора скорости V контролируемой среды на направление распространения ультразвукового сигнала. Принятый ультразвуковой импульс усиливается блоком 4 и поступает на формирователь запускающих импульсов 3, который вновь формирует импульс, поступающий на преобразователь 1. Процесс прохождения сигнала повторяется, благодаря чему возникает автоциркуляция импульсов в первом (ведущем) синхрокольце.

Аналогично работает второе синхрокольцо. В этом случае импульс с выхода формирователя запускающих импульсов 5 поступает на пьезоэлектрический преобразователь 2, который излучает короткий ультразвуковой сигнал. Этот сигнал проходит через контролируемую среду и принимается пьезодатчиком 1 через время, зависящее от расстояния между датчиками и суммы $C+V_1$. Принятый пьезодатчиком 1 ультразвуковой импульс усиливается блоком 4 и поступает на формирователь запускающих импульсов 5, который вновь формирует импульс, поступающий на пьезоэлектрический преобразователь 2. В результате повторения процесса прохождения сигналов

возникает автоциркуляция импульсов во втором (ведомом) синхрокольце. Оба синхрокольца одновременно работают в одном электроакустическом канале. Отличие ведомого синхрокольца от ведущего состоит в том, что в состав формирователя импульсов 5 входит схема контроля совпадения рабочих импульсов обоих синхроколец и восстановления работы ведомого синхрокольца со сдвигом на полпериода.

Работой синхроколец управляет блок 5, обеспечивающий необходимую их синхронизацию. С помощью системы автоподстройки блок 6 управляет работой генераторов импульсов 7 и 8. Импульсы с выходов управляемых генераторов 7 и 8 связаны по частоте и фазе с импульсами ведущего и ведомого синхроколец, но частоты следования их выше частот следования импульсов синхроколец в 200 раз. Последовательности импульсов от управляемых генераторов 7 и 8 поступают на смеситель 9, выделяющий разностную частоту, которая линейно зависит от скорости жидкости V в трубопроводе и не зависит от скорости ультразвука в контролируемой среде, а значит не зависит от изменения ее физических свойств. Последовательность импульсов разностной частоты с выхода смесителя 9 через масштабный преобразователь 10 подается на аналоговый преобразователь 12, который преобразует частоту в аналоговый сигнал. Аналоговый сигнал о расходе поступает на стрелочный индикатор расхода 13. Шестиразрядный электромеханический счетчик импульсов 11 позволяет контролировать количество жидкости, прошедшей по трубопроводу. В приборе предусмотрена система встроенного контроля, исправной работы прибора и опорожнения трубопровода. В данном расходомере допускается максимальное удаление пьезоэлектрических датчиков от измерительного прибора до 150 м.

Технические характеристики ультразвуковых расходомеров приведены в таблице 4.2. Каждый расходомер может быть настроен на один из пределов измерения, указанных для соответствующего диаметра. Нижний предел измерения этих приборов равен нулю. Температура контролируемой жидкости может быть в пределах от -60 до $+120$ °С, давление не более 6 МПа, скорость не

менее 0,3 см/с. Расходомер имеет частотный выход и два выхода постоянного тока 0-5 мА. Погрешность измерения приборов в режиме измерения расхода по частотному выходу не более 0,5 %, по токовому выходу не более 1,0 %, в режиме измерения количества жидкости - 0,3 %.

Таблица 4.2- Характеристики ультразвуковых расходомеров

Тип	D_y , мм	Верхний предел измерения, м ³ /с							
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
УЗР-В-0,4	400	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
УЗР-В-0,6	600	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5
УЗР-В-0,8	800	0,5	1,0	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
УЗР-В-1,0	1000	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	8,0	10,0

В местах установки ультразвуковых расходомеров необходимо предусматривать прямолинейные участки трубопроводов длиной не менее $5D_y$ до первичного преобразователя и не менее $3D_y$ после него.

4.7 Измерение количества и расхода тепла

Измерение количества вырабатываемой или потребляемой тепловой энергии, где в качестве теплоносителя используется вода, производится при помощи приборов, называемых теплосчетчиками. В основу этих приборов заложен расчетный метод, основанный на измерении температуры воды в прямом (подающем) и обратном трубопроводах, а также измерении ее расхода в тепловой сети. Таким образом, каждый прибор для учета тепловой энергии представляет собой комплекс, состоящий из расходомера, двух датчиков температуры и вычислительного устройства.

Расход тепла q , отпускаемый потребителю в единицу времени Дж/ч, выражается уравнением:

$$q = Q_M \cdot c_B \cdot (t_1 - t_2) = Q_O \cdot \rho \cdot c_B \cdot (t_1 - t_2), \quad (4.37)$$

где Q_M и Q_0 - расход воды в подающей линии массовый (кг/ч) и объемный ($\text{м}^3/\text{ч}$) соответственно; c_B - удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); ρ - плотность прямой воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; t_1 и t_2 - температура- прямой и обратной воды, °C, соответственно.

Прибор, измеряющий расход тепла в единицу времени, называется тепломером. Прибор, измеряющий расход и количество теплоты за некоторый промежуток времени, называется тепломером-счетчиком количества тепла или теплосчетчиком. С помощью счетчика-тепломера определяют количество тепла q_Σ в джоулях, полученное потребителем за отчетное время в соответствии с выражением:

$$q_\Sigma = \int_{\tau_1}^{\tau_2} q d\tau, \quad (4.38)$$

где τ – определенный промежуток времени.

В качестве прибора, измеряющего расход воды, могут быть использованы тахометрический и электромагнитный индукционный расходомер или дифманометр - расходомер с сужающим устройством. Для измерения разности температур прямой и обратной воды могут быть использованы термометры сопротивления или термоэлектрические термометры (термопары). Пределы допускаемой основной погрешности существующих тепломеров не превышают $\pm 2,5\%$ нормирующего значения измеряемой величины. При оценке погрешностей результата измерения количества или расхода тепла, отпускаемого потребителю, необходимо учитывать возможные методические погрешности, а также изменение показаний тепломера, обусловленное влиянием температуры окружающего воздуха, места установки измерителя расхода (расход теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах должен быть одинаковым) и других влияющих величин.

На рис. 4.22 показана упрощенная типовая схема тепломера. В этой схеме используются средства измерений с унифицированным входным и выходным сигналами.

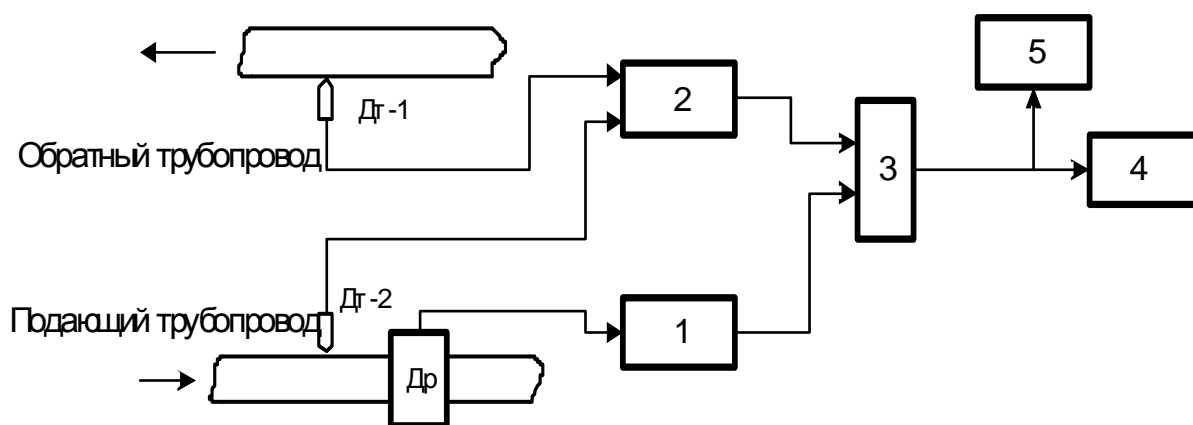


Рис. 2.44 - Типовая структурная схема тепломера

Разность температур прямой и обратной воды измеряется с помощью термометров сопротивления Дт-1, Дт-2 и измерительного преобразователя 2 с выходным сигналом постоянного тока 0-5 мА. Для измерения расхода прямой воды используется тахометрический или индукционный преобразователь расхода Др и измерительный блок 1 с выходным сигналом постоянного тока 0-5 мА.

Выходные сигналы преобразователя 2 и измерительного блока 1 поступают на вход множительного преобразовательного устройства 3, выходной сигнал постоянного тока (0-5 мА) которого пропорционален расходу тепла. В качестве вторичного прибора, регистрирующего расход тепла (Дж/ч), может быть использован миллиамперметр 4, например, типа КСУ2. Для определения количества тепла в джоулях, отпущенного потребителю за некоторый промежуток времени, служит интегратор 5 со счетным устройством.

В настоящее время существует большая номенклатура измерителей тепла как отечественного, так и зарубежного производства, отличающаяся в основном конструкцией и функциональными возможностями вычислительного блока.

В качестве примера приведем ниже характеристики некоторых из них.

Теплосчетчик ТС-20 состоит из преобразователя объемного расхода теплоносителя, двух термопреобразователей сопротивления и блока обработки

сигналов типа БОС. В качестве преобразователя объемного расхода теплоносителя в электрический сигнал постоянного тока 0-5 мА используется электромагнитный расходомер. Диапазоны изменения температуры теплоносителя в прямом трубопроводе составляют 70-150 °С, а в обратном - 30-70 °С. Разность температур теплоносителя в прямом и обратном трубопроводах находится в пределах от 30 до 100 °С. Расходомеры, входящие в состав измерителя теплоты, поставляются с диаметром условного прохода 10, 15, 25, 50, 80, 100, 150, 200, 300 мм, они устанавливаются в обратном трубопроводе и обеспечивают верхний предел измерения от 0,32 до 1000 м³/ч.

На выходе БОС формируется электрический сигнал постоянного тока 0-5 мА, пропорциональный расходу теплоты. Допускаемая основная погрешность теплосчетчиков данного типа составляет ±2,5 %. Допускаемая основная погрешность измерения расхода теплоты, определяемого по указателю расхода, равна ±10 %. Время установления рабочего режима теплосчетчиков 2 часа. К блоку обработки сигналов могут быть одновременно подключены последовательно один или несколько приборов с токовым входом, которые могут находиться на расстоянии до 1 км от блока, а их суммарное входное сопротивление, включая сопротивление линии связи, не должно превышать 2,5 кОм.

Блоком обработки сигналов является аналоговое вычислительное и преобразующее устройство, основную функциональную нагрузку в нем несет измерительный мост, в котором производится математическая обработка информации, поступающей от датчиков. Последующие элементы схемы предназначены для преобразования формы информации к виду, удобному для представления, передачи и регистрации. Блок предназначен для щитового монтажа, на его лицевой панели установлены электромеханический счетчик и индикатор расхода теплоты.

Преобразователь расхода предназначен для работы при температуре окружающего воздуха от -30 до +50 °С с относительной влажностью до 95 %, а

блок БОС - для работы при температуре 5-40 °С и относительной влажности до 80 %.

В измерителях теплоты типа ИРТ для измерения объемного расхода теплоносителя используется индукционный расходомер или дифманометр-расходомер, для измерения температуры прямого и обратного теплоносителя - термопреобразователи сопротивления. Блоком обработки сигналов является счетно-решающее устройство (УСР) дискретно-аналогового типа, выполненное на интегральных микросхемах, в котором производится математическая обработка сигналов, поступающих от датчиков. Для представления информации предусмотрены электромеханический счетчик, обеспечивающий цифровой отсчет количества теплоты, отпускаемой или потребляемой с сетевой водой, стрелочный индикатор и телеметрический преобразователь расхода теплоты. Кроме того, в измерителе исполнения «А» установлен блок выходного аналогового преобразователя для получения выходного унифицированного сигнала 0-5 мА. Модификации измерителя теплоты типа ИРТ приведены в таблице 4.3. Верхние пределы измерения объемного расхода теплоносителя составляют 1-1600 м³/ч. Основная приведенная погрешность всего комплекса не превышает ±3 %.

Измеритель предназначен для работы при температуре окружающего воздуха 5- 35 °С и относительной влажности до 80 %.

Таблица 4.3 - Характеристики измерителя теплоты типа ИРТ

Модификация измерителя теплоты	Температура теплоносителя, °С		Допустимая разность температуры в прямом и обратном трубопроводах, °С
	подающий трубопровод	обратный трубопровод	
ИРТ-31	70 - 150	30 - 70	20 - 100
ИРТ-32	50 - 115	30—70	10 - 45

Современные измерительные приборы тепловой энергии выпускаются с программируемыми вычислительными устройствами на базе

микропроцессорной техники. В этих приборах программным путем осуществляется коррекция измерений по плотности теплоносителя в зависимости от его температуры, т.к. непосредственное измерение плотности сетевой воды затруднительно и зависимость (4.37) заменена приближенной:

$$q \approx Q_o \cdot k \cdot \frac{t_1 - m \cdot (t_2 + a)}{t_1 + b}, \quad (4.39)$$

где Q_o - объемный расход теплоносителя;

t_1 - температура подающего теплоносителя;

k, a, b, m - программируемые коэффициенты.

В случае, если давление сетевой воды в подающей и обратной линиях постоянно, а температура теплоносителя находится в пределах, указанных выше, то погрешность приближенных расчетов тепловой энергии обычно не превышает 0,2%.

Программируемые теплосчетчики имеют также возможность архивации данных и отображения измеренных и вычисленных параметров за требуемый период времени

Контрольные вопросы

1. При помощи каких устройств определяют количество материальных потоков? Проведите их классификацию.
2. Какие приборы относятся к расходомерам переменного перепада давления? Запишите основное уравнение объемного (массового) расхода.
3. Какие сужающие устройства применяются при измерении расходов? Дайте их характеристику.
4. Основные требования к сужающим устройствам. Правила их установки в трубопроводах.
5. Покажите конструкцию трубки Пито. К какому типу расходомеров она может быть отнесена?
6. Какие параметры среды влияют на точность измерения расхода?
7. Какие приборы относятся к расходомерам обтекания? Запишите уравнение ротаметра.
8. Какие приборы относятся к тахометрическим расходомерам и счетчикам? Дайте их краткую характеристику.
9. Объясните принцип действия индукционных и ультразвуковых расходомеров. Для каких сред целесообразно их применение?
10. Покажите схему теплового счетчика и объясните принцип его работы.

5. КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЕЙ

Приборы для измерения уровня находят широкое применение при автоматизации технологических процессов в различных отраслях промышленности, водного и коммунального хозяйства. Они имеют разные принципы действия, конструктивное исполнение и условия эксплуатации, что необходимо учитывать при их выборе для автоматизации конкретного технологического процесса.

Измерение и контроль уровня жидкостей необходимы в тех случаях, когда поддержание его на некотором заданном значении связано с безопасностью работы технологического оборудования, например, уровень воды в барабане парового котла, а также для определения количества жидкости в различных резервуарах и баках.

Технические средства, применяемые для измерения уровня жидкости, называются уровнемерами. Приборы, предназначенные для сигнализации предельных уровней жидкости, называются сигнализаторами уровня.

Уровнемеры, предназначенные для измерения уровня для его регулирования, снабжены двусторонней шкалой, которая градуируется в сантиметрах, а для приборов, применяемых для измерения уровня воды в барабане котлов - в миллиметрах. Уровнемеры, служащие для измерения количества жидкости в резервуарах и баках, имеют одностороннюю шкалу, а приборы, применяемые для измерения уровня и поддержания его в заданных пределах, снабжены устройством сигнализации предельных отклонений уровня от заданных пределов.

В зависимости от требований, предъявляемых к объектам измерения, применяются различные методы измерения уровня. Если нет необходимости дистанционной передачи показаний уровнемеров, то для измерения уровня жидкости обычно достаточно применение указательных стекол, которое основано на принципе сообщающихся сосудов или показывающих дифманометров-уровнемеров.

Для дистанционного измерения уровня жидкостей, находящихся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением применяют метод измерения по разности давлений с помощью дифманометров, а также методов контроля с помощью поплавка (буйка), ультразвуковых, емкостных и т.д.

5.1. Уровнемеры поплавковые и буйковые

Простейшим прибором для измерения уровня жидкости в резервуарах является поплавковый указатель уровня. О положении уровня в этом случае судят по положению стрелки противовеса, соединенного с поплавком с помощью троса, перекинутого через блоки. Этот способ измерения позволяет контролировать уровень жидкости в резервуаре только в том случае, когда последний расположен сравнительно недалеко от поста наблюдения.

Для дистанционного измерения уровня используются электрические схемы, в которых при перемещении поплавка предусматривается изменение сопротивления, включенного в электрическую цепь. При этом можно использовать сопротивление как омическое, так и индуктивное.

В поплавковых указателях уровня с электрической передачей показаний на расстояние часто используется датчик в виде проволочного реостата или в виде кольцевой трубки, заполненной ртутью. В обоих случаях в качестве показывающего прибора используется логометр. Применяются также устройства, в которых изменение положения поплавка передается вторичному прибору через индукционный датчик. Устройство с использованием индукционной системы датчиков сельсинного типа представлено на рис. 5.1. Датчик такого уровнемера состоит из статора 1, изготовленного в виде стального ярма с двумя полюсами и двумя катушками возбуждения, последовательно включенными в сеть переменного тока, и ротора 2 с тремя обмотками, симметрично сдвинутыми по отношению друг к другу. Концы обмоток ротора присоединены к изолированным друг от друга коллекторным

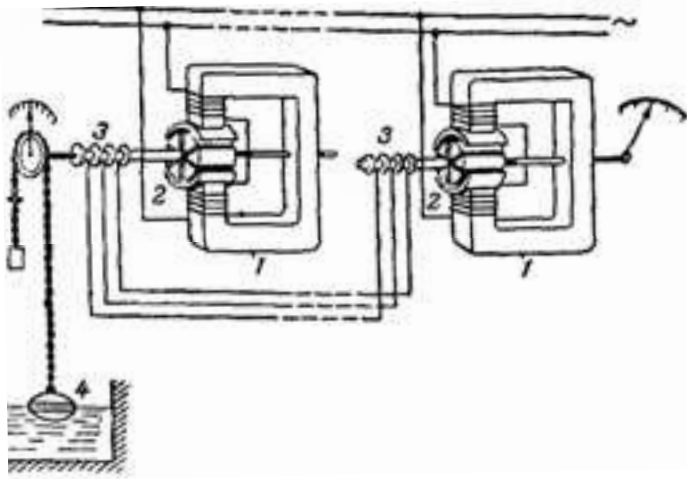


Рис. 5.1 - Поплавковый указатель уровня с датчиком индукционного типа

кольцам 3, насаженным на валу ротора. Переменный ток, проходящий через катушки возбуждения, индуцирует в обмотках ротора датчика и указателя э.д.с., значения которых будет определяться положением этих обмоток относительно магнитного поля статора. Если оба ротора расположены одинаково, то и

наведенные в них э.д.с. тоже равны, а следовательно, в обмотках роторов тока нет. Перемещение поплавка 4 вызовет поворот ротора датчика, при котором возникнут токи, вызывающие поворот ротора указывающего прибора на такой же угол, как ротор датчика.

Следует указать, что величина напряжения, частота и сопротивления проводов при применении такой схемы практически не влияют на результаты измерения. С изменением напряжения и сопротивления проводов изменяется только движущая сила датчика. Для этого устройства максимальный угол шкалы равен 270° .

Для целей сигнализации предельных уровней жидкости в резервуарах применяются контактные приборы, они также используются в автоматических устройствах в качестве элемента, срабатывающего при определенных предельных уровнях жидкости в резервуаре. Из приборов этого типа рассмотрим поплавковое реле типа РМ-21, предназначенное для сигнализации положения уровня жидкости в открытых резервуарах, и типа СУ-5 для сигнализации положения уровня жидкости в закрытых резервуарах.

На рис. 5.2-а показана схема установки реле типа РМ-21. Реле состоит из поплавка 1 и противовеса 2, соединенных с помощью троса (цепи), перекинутого через блок 7, и контактного устройства 3. На разных уровнях

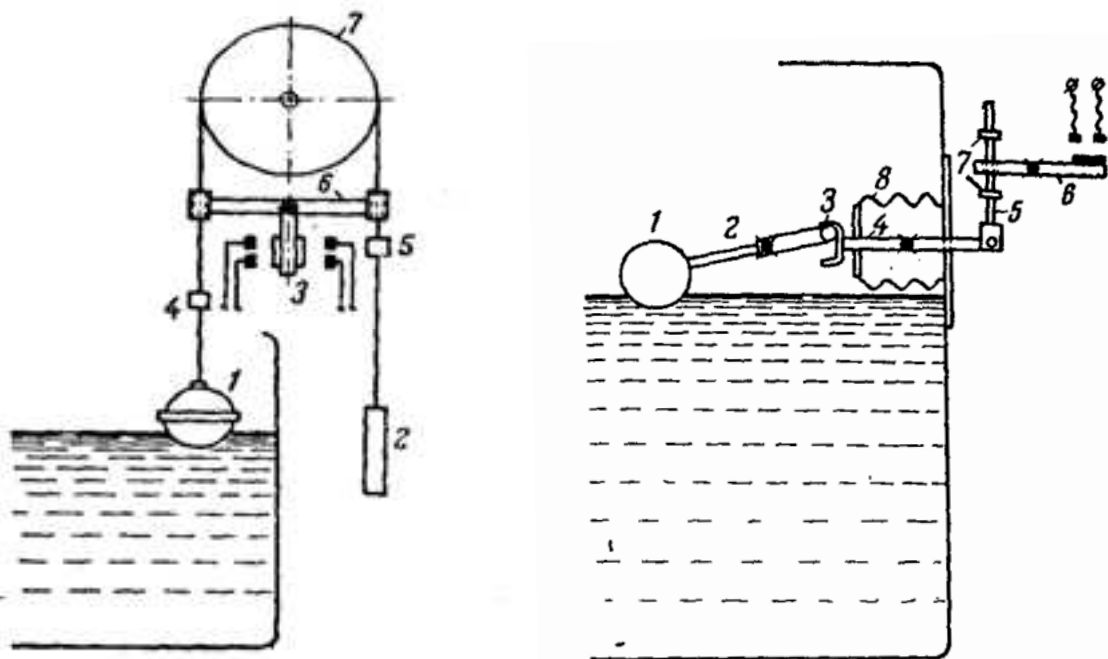


Рис. 5.2 - Поплавковые сигнализаторы уровня:
а- сигнализатор типа РМ-21; б- сигнализатор типа СУ-5

троса укреплены две переключающие шайбы 4 и 5, которые при предельных уровнях жидкости в резервуаре поворачивают коромысло 6 контактного устройства и замыкают контакты реле.

Схема реле типа СУ-5 изображена на рис. 5.2-б. При перемещении поплавка 1 рычаг 2, жестко связанный с поплавком, с помощью штифта 3 действует на кулачок промежуточного рычага 4, второй конец которого шарнирно соединен со штангой 5, перемещающейся в ушке контактного рычага. На штанге 5 в соответствующих местах укреплены две шайбы 7, которые при максимальном или минимальном уровне жидкости в резервуаре поворачивают контактный рычаг 6 и замыкают контакты реле. Для вывода рычага 4 из резервуара применяется сильфон 8. Контакты реле настраиваются на замыкание для минимального или максимального предела уровня.

Для дистанционного измерения уровня жидкости, находящейся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, широкое применение нашли буйковые уровнемеры с унифицированным выходным электрическим сигналом типа УБ-Э и пневматическим сигналом типа УБ-П.

Действие этих уровнемеров основано на принципе компенсации усилия, развиваемого буйком, перемещающегося с жидкостью при изменении ее уровня. Устройство буйкового уровнемера схематично показано на рис. 5.3.

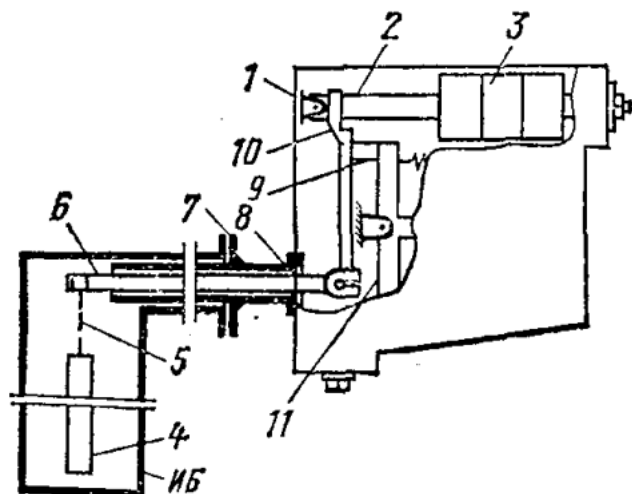


Рис. 5.3 - Схема буйкового уровнемера

Буйковый уровнемер присоединяется к объекту измерения при помощи фланца 7 и состоит из измерительного блока ИБ и преобразователя 1 с электро- или пневмосиловой компенсацией. Измерительный блок представляет собой рычажную систему с чувствительным элементом в виде буйка 4, взаимозаменяемым для уровнемеров типов УБ-Э и

УБ-П. Боек, соединенный со стержнем 5, подвешен к рычагу вывода 6 с помощью призмы. Выходящая часть рычага 6 из полости, находящейся под рабочим давлением, уплотнена с помощью мембраны 8. Конец этого рычага с помощью поводка и ленточной тяги 9 соединен с рычагом 11 преобразователя 1.

Преобразователи уровнемеров имеют дополнительный рычаг 2, на котором расположены грузы 3. Деталь 10 этого рычага соединена с поводком рычага вывода двумя упругими лентами (на схеме не показаны). Начальная сила тяжести буйка уравновешена грузом 3. Такое положение буйка соответствует нижнему уровню жидкости в резервуаре, при котором выходной сигнал уровнемера равен максимальному (верхнему) значению $I_{\text{вых}} = 5; 20 \text{ мА}$ или $P_{\text{вых}} = 0,1 \text{ МПа}$. При подъеме уровня жидкости в резервуаре выходной сигнал уменьшается и при максимальном уровне равен $I_{\text{вых}} = 0 \text{ мА}$ 0 или $P_{\text{вых}} = 0,02 \text{ МПа}$.

Уровнемеры УБ-Э могут работать в комплекте с миллиамперметрами типа КСУ2 и другими, а также совместно с автоматическими регуляторами уровня и с информационно-вычислительными и управляющими машинами. Уровнемеры типа УБ-П применяют с любыми вторичными показывающими или самопишущими приборами пневматической ветви ГСП, а также с пневматическими регуляторами.

Уровнемеры типа УБ-Э и УБ-П используются для измерения уровня жидкостей с температурой не выше 400°C . Они выпускаются на предельно допускаемое рабочее избыточное давление 6,4 и 10 МПа. Эти уровнемеры имеют класс точности 1 и 1,5. Изготавливают их с различными размерами (диаметром и длиной) буйка, позволяющими выполнять измерения уровней в диапазонах от 0 - 0,04 до 0 - 16 м.

Уровнемеры буйковые электрические типа УБ-Э выпускают также во взрывозащищенном исполнении для измерения уровня в объектах с температурой жидких сред от -40 до $+200^{\circ}\text{C}$.

5.2. Акустические и ультразвуковые уровнемеры

В принцип работы акустических и ультразвуковых уровнемеров заложен метод, основанный на использовании эффекта отражения звуковых колебаний от границы раздела двух сред с различными акустическими сопротивлениями.

В акустических уровнемерах используется метод локаций уровня жидкости через газовую среду. Достоинством этого метода является то, что акустическая энергия, посланная в объект для измерения уровня, распространяется через газовую (воздушную) среду. Это обеспечивает универсальность по отношению к различным средам, уровень которых необходимо измерить, а также высокую надежность первичных преобразователей, не контактирующих с измеряемой средой.

В ультразвуковых уровнемерах используется метод, основанный на отражении ультразвуковых колебаний от границы раздела сред.

В зависимости от используемого параметра звуковой волны различают частотный, фазовый и импульсный способы измерения уровня, а также их комбинации, такие, как импульсно-частотный, и др. Каждый из этих способов, обладая общими для акустического (ультразвукового) метода измерения достоинствами, имеет свои преимущества и недостатки.

Акустические уровнемеры широко применяют для дистанционного измерения уровня различных сред во многих областях промышленности. Уровнемеры этого типа используются для измерения уровня различных жидкостей (однородных и неоднородных, вязких, агрессивных, кристаллизующихся), находящихся под давлением до 4 МПа и имеющих температуру от 5 до 80 °С. Акустические уровнемеры не могут быть использованы для измерения уровня жидкостей, находящихся под высоким избыточным и вакуумметрическим давлением.

Ультразвуковые уровнемеры могут быть использованы для измерения уровня только однородных жидкостей и находящихся под высоким избыточным давлением.

Акустический уровнемер типа ЭХО предназначен для бесконтактного дистанционного измерения уровня жидких сред, а также сыпучих и кусковых материалов с диаметром гранул от 2 до 200 мм. Мерой уровня является время распространения звуковых колебаний t от источника излучения (акустического преобразователя) до плоскости границы раздела сред и обратно до приемника. Структурная схема акустического уровнемера типа ЭХО приведена на рис.5.4.

Время распространения звуковых колебаний определяется в соответствии с выражением:

$$t = \frac{2 \cdot (H - h)}{a}, \quad (5.1)$$

где $(H-h)$ – высота воздушного столба;

H – расстояние от источника излучения до нулевого уровня;

h – уровень измеряемой среды;

a – скорость звука в воздухе.

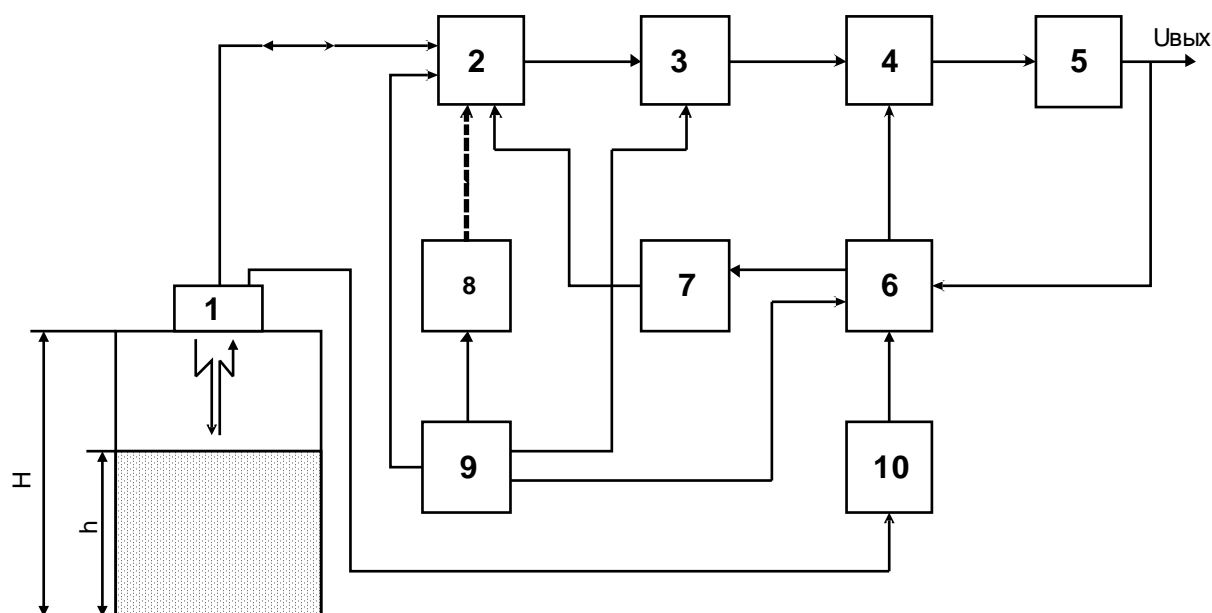


Рис. 5.4 - Схема акустического уровнемера типа ЭХО

Акустический уровнемер включает в себя генератор электрических импульсов 9, которые преобразуются в ультразвуковые акустическим преобразователем 1 с помощью пьезокерамического диска. Акустический преобразователь устанавливается на крышке резервуара. Распространяясь вдоль акустического тракта, ультразвуковые импульсы отражаются от плоскости границы раздела сред и попадают на тот же преобразователь. Отраженные ультразвуковые импульсы после обратного преобразования в электрические усиливаются, формируются усилителем-формирователем 2 и подаются на устройство измерения времени запаздывания отраженного сигнала 3, в качестве которого используется триггер.

Выходной сигнал постоянного тока 0 – 5 мА формируется при помощи компенсационного преобразователя, работающего по принципу статического регулятора, включающего в себя устройство сравнения 4, усилительно-преобразующее устройство и элемент обратной связи – блок преобразования напряжения во временной интервал 6.

Формирование выходного сигнала осуществляется путем автоматического слежения блоком 6 за длительностью импульсов триггера.

Прямоугольные импульсы триггера и из цепи обратной связи компенсационного преобразователя подаются на устройство сравнения 4. Если длительность импульса с триггера не равна длительности импульса из цепи обратной связи, то на выходе блока 4 появляется сигнал небаланса, который при помощи усилительно-преобразующего устройства 5 меняет значение выходного сигнала. Это происходит до тех пор, пока сигнал рассогласования не станет равным нулю. В данной схеме уровнемер амплитуда и частота повторения импульсов не влияют на значение выходного сигнала, именно поэтому слежение происходит за длительностью импульсов.

Для уменьшения влияния изменения температуры газа на показания прибора (скорость распространения звука в газовой среде зависит от температуры) уровнемер содержит блок температурной компенсации 10, который включает в себя термометр сопротивления, расположенный внутри акустического преобразователя.

В схеме уровнемера предусмотрено помехозащитное устройство 7, исключаящее влияние на показания прибора помех от токов промышленной частоты на входе усилителя 2.

Для проверки работоспособности электрической схемы уровнемера используется блок контроля 8. Основные функциональные узлы электрической схемы прибора выполнены на основе электронных интегральных микросхем.

Акустический уровнемер типа ЭХО выпускается на диапазоны измерения 0 - 1, 0 - 2 и 0 - 3 м. Класс точности уровнемера составляет 2,5.

Ультразвуковой уровнемер. Эти уровнемеры предназначены для измерения уровней жидкости и сжиженных газов. В типовой схеме ультразвукового уровнемера используется импульсный способ измерения уровня по отражению ультразвуковых колебаний от границы раздела сред со стороны жидкости. Мерой уровня жидкости h в этом случае является также время прохождения ультразвуковых колебаний t от пьезокерамического преобразователя (излучателя) до плоскости границы раздела сред (жидкость - газ) и обратно до приемника. Структурная схема ультразвукового уровнемера

приведена на рис. 5.5. Время прохождения ультразвуковых колебаний t определяется по выражению:

$$t = \frac{2 \cdot h}{a}, \quad (5.2)$$

где a – скорость распространения звука в жидкости.

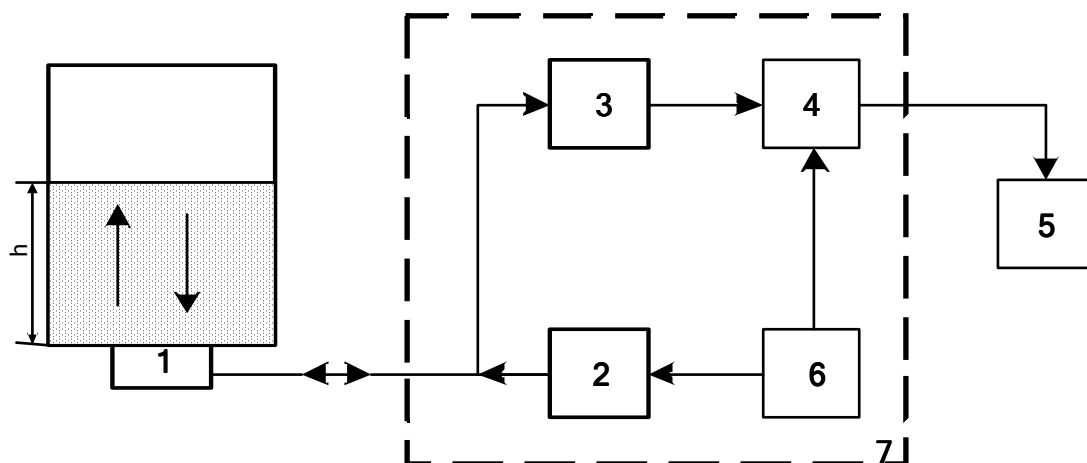


Рис. 5.5. – Схема ультра звукового уровнемера

Уровнемер состоит из пьезокерамического преобразователя 1, электронного блока 7 и вторичного прибора 5. Электронный блок включает в себя генератор 6, задающий частоту повторения импульсов; генератор импульсов 2, посылаемых в жидкость, уровень которой измеряется; приемного устройства -усилителя 3; схемы измерения времени 4. Задающий генератор 6 управляет работой генератора акустических импульсов 2 и схемой измерения. Преобразователь 1 крепится на дне резервуара, в котором производится измерение уровня жидкости. Распространяясь в среде, ультразвуковые импульсы отражаются от границы раздела жидкость – газ, поступают на тот же преобразователь. Эти импульсы после обратного преобразования в электрические усиливаются усилителем 3 и поступают в схему измерения времени. Выходным сигналом уровнемера является напряжение постоянного тока, которое подается на вход вторичного прибора 5, например, автоматического потенциометра.

Выпускаемые ультразвуковые расходомеры имеют верхние пределы измерения уровня от 0,4 до 20 м и используются для рабочего избыточного давления до 2,5 МПа, при этом максимальная допустимая погрешность для них не превышает 2,5% от максимального диапазона измерения.

5.3. Емкостные уровнемеры

Емкостные уровнемеры широко применяют для сигнализации и дистанционного измерения уровня однородных жидкостей для различных объектов. Они могут быть использованы для измерения уровня жидкостей, находящихся под давлением до 2,5 - 6,0 МПа и с температурой от -40 до +200 °С, что обусловлено надежностью применяемой изоляции для изготовления общепромышленных первичных преобразователей емкостных уровнемеров.

Емкостные уровнемеры не могут быть использованы для измерения уровня вязких (более 0,980 Па·с), пленкообразующих, кристаллизующихся жидкостей, а также взрывоопасных сред.

Действие емкостных уровнемеров основано на пропорциональном изменении электрической емкости первичного преобразователя, при изменении контролируемого уровня жидкости в резервуаре. Первичный преобразователь, преобразующий изменение уровня жидкости в пропорциональное изменение емкости, представляет собой, например, цилиндрический конденсатор, электроды которого расположены коаксиально. Емкость первичного преобразователя определяется как емкость двух параллельно соединенных конденсаторов, один из которых образован частью электродов преобразователя и жидкостью, уровень которой измеряется, а второй - остальной частью электродов преобразователя и воздухом или парами жидкости.

Емкость первичного преобразователя таких уровнемеров функционально связана с диэлектрической проницаемостью веществ. Поэтому при измерении уровня жидкости емкостным уровнемером следует учитывать изменение диэлектрической проницаемости жидкости с изменением ее температуры.

В зависимости от электрических характеристик жидкости их разделяют на неэлектропроводные и электропроводные. Жидкости, имеющие удельное сопротивление $\rho > 10^7 - 10^8$ Ом·м и относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{\text{ж}} \leq 5 - 6$, относятся к группе неэлектропроводных, а жидкости, имеющие $\rho \leq 10^5 - 10^6$ Ом·м и $\epsilon_{\text{ж}} \geq 7 - 10$, относятся к группе электропроводных. Здесь необходимо отметить, что удельное электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость жидкостей зависят от частоты напряжения, которое подводится к измерительному преобразователю. Вследствие различия электрических характеристик жидкостей емкостные преобразователи уровнемеров выполняют различным образом. Так, электроды преобразователей для неэлектропроводных жидкостей не изолируют, а для электропроводных жидкостей они покрываются электрической изоляцией.

Некоторые типы емкостных уровнемеров могут применяться для сигнализации и дистанционного измерения уровня сыпучих тел с постоянной влажностью.

Рассмотрим на примере емкостного преобразователя для неэлектропроводных

жидкостей (см. рис. 5.6) работу емкостного уровнемера, выполненного в виде цилиндрического конденсатора из двух коаксиальных труб 2 и 3, размещенных в резервуаре 1.

Емкость преобразователя $C_{\text{оа}}$, измеренная на зажимах a , когда между электродами 2 и 3 на рабочем их участке высотой H находится воздух,

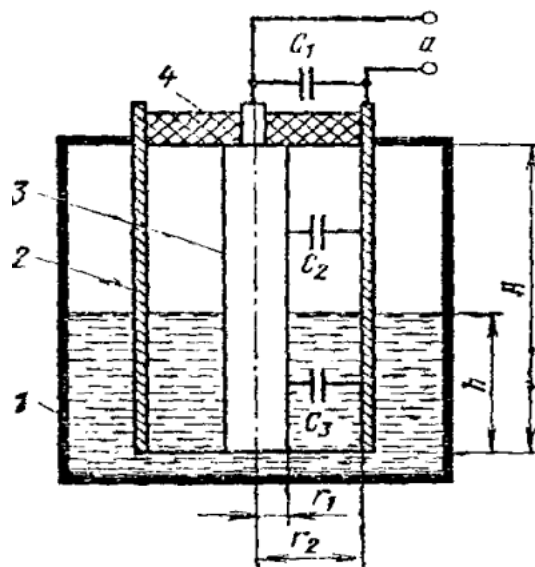


Рис. 5.6 - Схема емкостного преобразователя для измерения уровня неэлектропроводных жидкостей

определяется выражением:

$$C_{na} = C_1 + C_{оп}, \quad (5.3)$$

где. C_1 - емкость проходного изолятора 4;

$C_{оп}$ – начальная емкость датчика

Начальная емкость датчика определяется согласно формуле:

$$C_{оп} = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot H}{\ln(r_2 / r_1)}, \quad (5.4)$$

где ε_0 - диэлектрическая проницаемость свободного пространства, Ф/м;

r_1 и r_2 – радиусы электродов, м.

Если конденсатор преобразователя заполнен измеряемой жидкостью на высоту h , а на участке $H-h$ находятся воздух и пары этой жидкости, то емкость датчика определится суммой емкостей соответствующих участков:

$$C_{па} = C_1 + C_2 + C_3, \quad (5.5)$$

$$\text{где } C_2 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot (H - h)}{\ln(r_2 / r_1)}, \quad (5.6)$$

$$C_3 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{ж} \cdot h}{\ln(r_2 / r_1)}, \quad (5.7)$$

здесь ε_2 – диэлектрическая проницаемость воздуха и паров жидкости, Ф/м;

$\varepsilon_{ж}$ - диэлектрическая проницаемость жидкости, Ф/м.

Тогда с учетом выражения (5.4) и того, что $\varepsilon_2 \approx \varepsilon_0 \approx 1$, емкость преобразователя уровнемера выразится следующим уравнением:

$$C_{па} = C_{оп} \cdot \left[1 + (\varepsilon_{ж} - 1) \cdot \frac{h}{H} \right]. \quad (5.8)$$

Для того, чтобы учесть изменения диэлектрической проницаемости неэлектропроводной жидкости $\varepsilon_{ж}$ при измерениях, в состав емкостного преобразователя уровнемера должна быть включена компенсационная емкость (компенсационная часть), постоянно заполненная контролируемой жидкостью. При работе же уровнемера в электропроводящих жидкостях емкостные элементы преобразователя покрываются фторопластовой изоляцией, а вместо

компенсационной части к преобразователю подключают добавочную электрическую емкость.

В настоящее время в промышленности широко используются емкостные уровнемеры типа РУС. Эти уровнемеры выпускаются как обычного (РУС-О), так и взрывозащищенного (РУС-В) исполнений. В их состав входят первичный преобразователь ПП и передающий измерительный преобразователь ПИ. Первичные преобразователи ПП-0 и передающие измерительные преобразователи ПИ-0 уровнемеров обыкновенного исполнения предназначены для работы только в помещениях и наружных установках, в которых по условиям работы не образуются взрывоопасные смеси паров и газов с воздухом. Преобразователь ПП-В уровнемеров взрывозащищенного исполнения предназначен для установки во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок. Преобразователь ПИ-В уровнемеров взрывозащищенного исполнения с выходными искробезопасными цепями предназначен для установки вне взрывоопасных зон.

Первичные преобразователи устанавливают на резервуарах с контролируемой средой, а передающие измерительные преобразователи на щитах, пультах управления, кронштейнах.

Классы точности емкостных уровнемеров зависят от верхнего предела измеряемого уровня. Точность измерения уровня от верхнего предела измерения H_{\max} уровнемеров типа РУС приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Классы точности уровнемеров типа РУС

$H_{\max,}$ м	Классы точности				$H_{\max,}$ м	Классы точности				$H_{\max,}$ м	Классы точности			
	0,5	1,0	1,5	2,5		0,5	1,0	1,5	2,5		0,5	1,0	1,5	2,5
0,4	-	-	+	+	2,5	+	+	+	+	1,	+	+	+	+
0,6	-	-	+	+	4,0	+	+	+	+	16	-	+	+	+
1,0	+	+	+	+	6,0	+	+	+	+	20	-	+	+	+
1,6	+	+	+	+										

5.4. Уровнемеры дифманометрические

Для измерения уровня жидкостей в баках, аппаратах и резервуарах, находящихся под атмосферным, избыточным и вакуумметрическим давлением, часто применяется метод измерения, основанный на определении разности давлений. При этом в качестве измерительных приборов, в зависимости от требований, предъявляемых к автоматизации технологических процессов, применяют различные типы дифманометров. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний уровня, то целесообразно применять дифманометры с отсчетным устройством. Эти дифманометры могут быть снабжены контактными устройствами для сигнализации предельных значений уровня. Для дистанционного измерения уровня могут быть использованы дифманометры или преобразователи давления с электрическим или пневматическим выходным сигналом в комплекте с соответствующими вторичными приборами. К приборам давления, используемым при определении уровня, относятся дифманометры: сильфонные типа ДСС и ДСП, мембранные электрические ДМЭУ-МИ, измерительные преобразователи разности давления 13ДД11, преобразователи гидростатического давления типа «Сапфир-22ДГ», а также разности давлений «Сапфир-22ДД».

Поскольку жидкость, уровень которой измеряется, может находиться под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, то это необходимо учитывать при выборе типа и модели дифманометра, так как они выпускаются на различное предельно допускаемое рабочее избыточное давление. Предельный номинальный перепад давления дифманометра выбирают в зависимости от диапазона измерения уровня.

Для присоединения дифманометра к баку или другому устройству применяют различные типы уравнительных сосудов. В качестве примера на рис. 5.7 показана общая схема измерения уровня нейтральной, невязкой жидкости, находящейся в баке или резервуаре под атмосферным давлением.

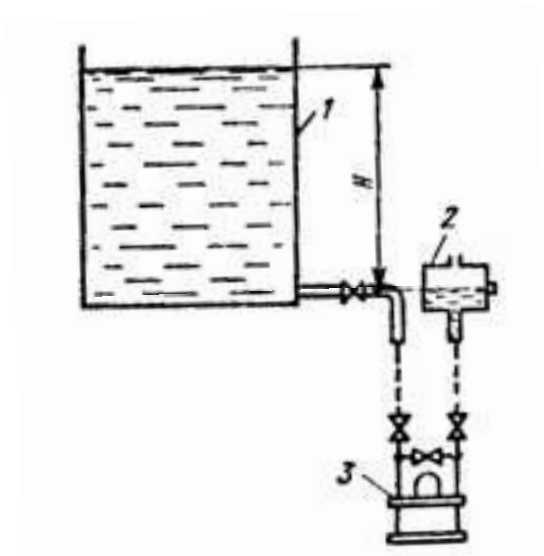


Рис. 5.7 - Измерение уровня дифманометром при атмосферном давлении

При измерении уровня в баке 1 должно быть обеспечено постоянство уровня в сосуде 2, установленного при нижнем уровне жидкости в баке. Поэтому этот сосуд должен иметь такой размер, при котором можно было бы пренебречь дополнительной погрешностью дифманометра, вызываемой изменением уровня в сосуде от начального его положения при измерении дифманометром-уровнемером 3 верхнего уровня жидкости H в баке.

Если свойства жидкости, уровень которой необходимо измерять, не позволяют подключать дифманометр по схеме, показанной на рис. 5.7, необходимо вместо уравнительного сосуда применять разделительные сосуды или разделительные устройства других типов, которые должны располагаться в соединительных линиях максимально близко к баку или резервуару.

Размеры уравнительных и разделительных сосудов обычно выбирают в зависимости от объема плюсовой и минусовой камер дифманометра. При применении разделительных устройств другого типа необходимо учитывать возможное изменение показаний уровнемера.

В случае незначительного изменения плотности измеряемой жидкости, расчет шкалы дифманометра производится для среднего значения плотности жидкости.

Для измерения уровня жидкостей в объектах, находящихся под давлением, например, барабанах паровых котлов, конденсаторах, паровых подогревателях воды и т.д. применяются различные схемы подключения дифманометров, а также различные типы разделительных сосудов.

При измерении уровня в барабане парогенератора дифманометром распространена схема с использованием стандартного двухкамерного уравнительного сосуда, которая приведена на рис. 5.8.

В широкой части сосуда 1, присоединенного к паровому пространству барабана котла, уровень воды (конденсата) поддерживается постоянным. В трубе 2 уравнительного сосуда, подключенной к водяному пространству барабана, уровень воды будет меняться с изменением уровня в барабане. Для исключения возможного образования водяных пробок линия и вентиль, подключенные к широкому сосуду, должны располагаться горизонтально.

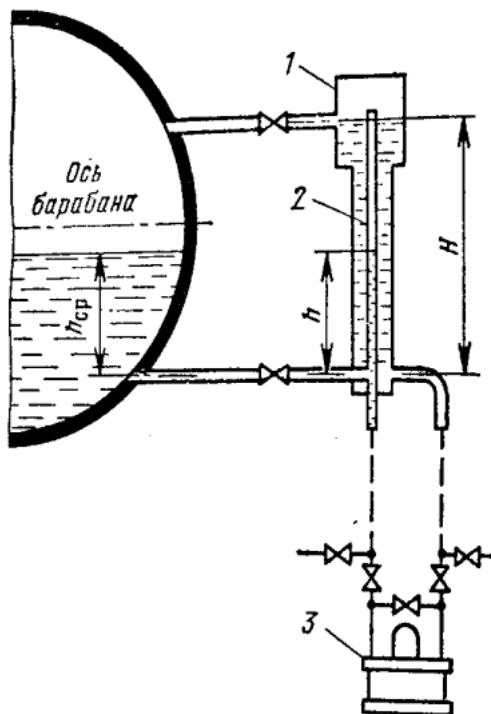


Рис. 5.8 - Измерение уровня в барабане котла при помощи двухкамерного уравнительного сосуда

Разность давлений, создаваемая двухкамерным уравнительным сосудом, измеряется дифманометром 3 и определяется по выражению:

$$\Delta p = (H - h) \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g \quad (\text{Па}), \quad (5.9)$$

где H и h – высота столба воды в сосуде и трубке соответственно, м;

ρ' и ρ'' – плотность воды и пара в состоянии насыщения при рабочем давлении, кг/м^3 .

Из этого уравнения следует, что при верхнем уровне воды в барабане котла $h = H$ и при любом рабочем давлении $\Delta p_n = 0$, а при нижнем уровне $h = 0$ и $\Delta p_n = H \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g$. Для получения нижнего перепада давления в мм вод. ст. пользуются следующим соотношением:

$$\Delta p_n = 0,102 \cdot H \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g. \quad (5.10)$$

Для градуировки шкалы вторичного прибора по промежуточным точкам шкалы дифманометра N_x , лежащим внутри измеряемого диапазона уровней, пользуются следующим выражением:

$$\Delta p_x = 0,5 \cdot \Delta p_n \cdot \left(1 - \frac{\pm N_x}{|N|}\right), \quad (5.11)$$

где N – предел измерения дифманометра, мм.

Пример 5.1. Произвести расчет шкалы вторичного прибора дифманометра, работающего с двухкамерным уравнильным сосудом для измерения уровня в барабане парового котла при следующих исходных данных: рабочее давление в котле 5 МПа, а шкала вторичного прибора составляет $N = \pm 500$ мм.

При заданном рабочем давлении температура в котле составит $262,7^\circ\text{C}$ (по справочным данным), а плотность воды и пара для этих условий соответственно будет равна $\rho' = 782,5 \text{ кг/м}^3$ и $\rho'' = 24,9 \text{ кг/м}^3$. Измеряемая высота столба воды в широкой части разделительного сосуда $H = 2 \cdot |N| \cdot 10^{-3} = 1,0$ м. В соответствии с формулой (5.10) определяем Δp_n :

$$\Delta p_n = 0,102 \cdot 1,0 \cdot (782,5 - 24,9) \cdot 9,81 = 758 \text{ мм вод.ст.}$$

Пользуясь соотношением (5.11), определяем значения перепада давлений Δp_x для различных промежуточных точек шкалы прибора. Результаты расчета сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

N_x мм	500	400	300	200	100	0	-100	-200	-300	-400	-500
Δp_x мм вод.ст	0	75,8	151,6	227,4	303,2	379	454,8	530,6	606,4	682,2	758

При измерении уровня воды в барабане котла может быть использована схема с использованием однокамерного уравнильного сосуда, которая приведена на рис. 5.9. Такие схемы измерения применяют при рабочих давлениях пара не более 16 МПа

По данной схеме измерения в уравнильном сосуде 1, который присоединен к паровому пространству барабана, поддерживается постоянный уровень воды (конденсата). Такой сосуд применяют без тепловой изоляции. Труба 3 подсоединена к водяному пространству барабана.

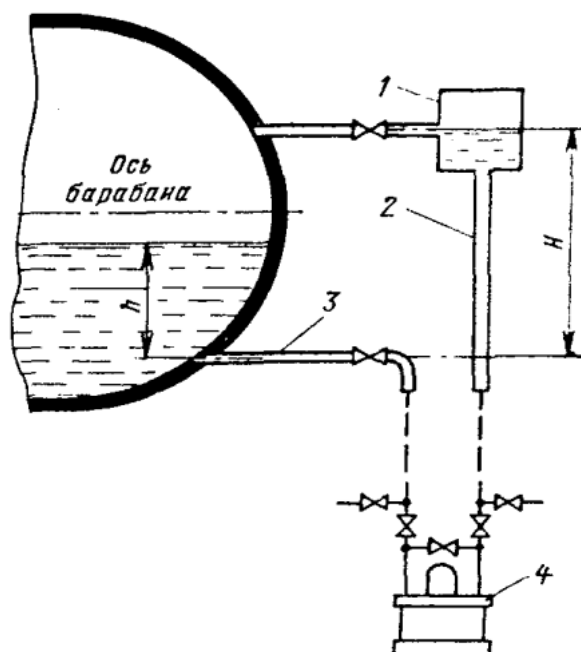


Рис. 5.9 - Измерение уровня в барабане котла при помощи однокамерного уравнительного сосуда

Разность давлений, создаваемую уравнительным сосудом (Па), измеряют при помощи дифманометра 4, которая определяется следующим выражением:

$$\Delta p = [H \cdot (\rho_v - \rho') - h \cdot (\rho' - \rho'')] \cdot g, \quad (5.12)$$

где ρ_v – плотность столба H воды в разделительном сосуде.

Из представленного уравнения определим максимальную разность давлений при $h = H$ и минимальную разность давлений при $h = 0$:

$$\Delta p_v = H \cdot (\rho_v - \rho') \cdot g; \quad (5.13)$$

$$\Delta p_n = H \cdot (\rho_v - \rho'') \cdot g. \quad (5.14)$$

Разность давлений Δp_x , соответствующая отметкам шкалы дифманометра N_x в диапазоне измерений от $+N$ до $-N$, определяется по следующей формуле:

$$\Delta p_x = 0,5 \cdot \left[\Delta p_n + \Delta p_v - (\Delta p_n - \Delta p_v) \cdot \frac{\pm N_x}{|N|} \right] \quad (5.15)$$

Пример 5.2. Произвести расчет шкалы дифманометра для тех же рабочих условий, что и в примере 5.1. При этом принять $\rho_v = 985,3 \text{ кг/м}^3$ (при $p = 5 \text{ МПа}$ и $t = 60^\circ \text{C}$).

Пользуясь формулами (5.13) и (5.14) определяем перепады давления, соответствующие верхнему и нижнему значению уровня в барабане котла, выраженные в мм вод.ст.:

$$\Delta p_{\text{в}} = 0,102 \cdot 1,0 \cdot (985,3 - 782,5) \cdot 9,81 = 202,9 \text{ (мм вод.ст.)};$$

$$\Delta p_{\text{н}} = 0,102 \cdot 1,0 \cdot (985,3 - 24,9) \cdot 9,81 = 960,9 \text{ (мм вод.ст.)}.$$

Используя уравнение (5.15), определяем значения перепадов давления Δp_x для отметок N_x прибора. Результаты расчета сведем в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

N_x , мм	500	400	300	200	100	0	-100	-200	-300	-400	-500
Δp_x , мм вод.ст	202,9	278, 7	354,5	430,3	506,1	581, 9	657, 7	733, 5	809, 3	885, 1	960, 9

Для повышения точности измерения уровня воды в барабане парового котла применяются и другие схемы, позволяющие вводить коррекцию по давлению, температуре и разности плотностей воды и пара.

Коррекция по давлению или температуре не обеспечивает достаточной точности измерения уровня воды в барабане мощных парогенераторов при меняющихся давлениях пара в широких пределах, т.к. изменение разности плотностей воды и пара $\rho' - \rho''$ не является линейной функцией давления (или температуры) пара в барабане.

Уровнемер с коррекцией по разности плотностей воды и пара позволяет с достаточной точностью измерять уровень воды в барабане при отклонении давления пара от номинального значения в широких пределах, а также при пусках и остановках парогенераторов. Для такого уровнемера используется специальный сдвоенный двухкамерный уравнительный сосуд, схема которого показана на рис. 5.10, позволяющий присоединять два дифманометра: один для измерения уровня воды в барабане, а второй (корректирующий) для измерения разности плотностей воды и пара. В этой схеме используются дифманометры типа ДМЭ с выходным сигналом постоянного тока 0 – 5 мА.

В соответствии с приведенным рисунком, к нижней части уравнительного сосуда присоединен дифманометр ДМ-1, который измеряет уровень воды в

барабане. К верхней части сосуда присоединен дифманометр ДМ-2, измеряющий разность плотностей воды и пара ($\rho' - \rho''$). Оба дифманометра подключают к вторичному прибору, типа КСУ или КСП, устанавливаемому на щите парогенератора или блока.

Разность давлений, создаваемая нижней частью уравнительного сосуда, которую измеряет дифманометр ДМ-1, определяется выражением:

$$\Delta p_1 = (H_1 - h) \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g. \quad (5.16)$$

Разность давлений, создаваемая верхней частью сосуда и измеряемая дифманометром ДМ-2, пропорциональна разности плотностей воды и пара, определяемая в соответствии с выражением:

$$\Delta p_2 = H_2 \cdot (\rho' - \rho'') \cdot g. \quad (5.17)$$

Для уменьшения влияния на показания уровнемера охлаждения воды в сдвоенном двухкамерном уравнительном сосуде его полностью закрывают тепловой изоляцией, а поддержание постоянства высот столбов воды H_1 и H_2 обеспечивается конденсацией пара в дополнительной трубе-конденсаторе, не покрытой тепловой изоляцией.

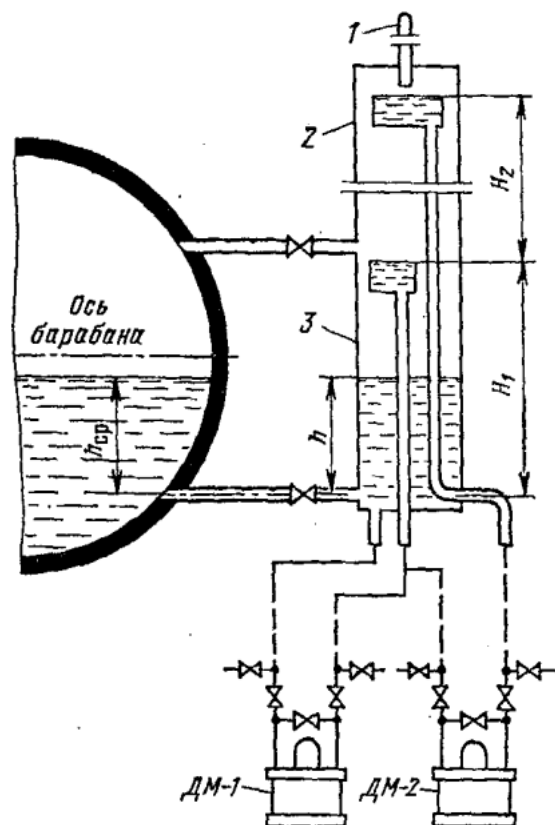


Рис. 5.10 - Измерение уровня в барабане котла с коррекцией по разности плотностей воды и пара: 1- труба-конденсатор; 2 - верхняя часть уравнительного сосуда для измерения $\rho' - \rho''$; 3- нижняя часть уравнительного сосуда для измерения уровня воды в барабане

Контрольные вопросы

1. В каких технологических объектах измерение уровня является одним из основных измерений?
2. Какого типа уровнемеры используются в промышленности?
3. Покажите схему поплавкового уровнемера жидкости. Какими преимуществами и недостатками он обладает?
4. Чем отличаются акустические и ультразвуковые уровнемеры? Покажите их структурные схемы и объясните принцип работы.
5. Изобразите принципиальную схему емкостного уровнемера и поясните принцип его работы.
6. Запишите уравнения для расчета емкостного преобразователя уровня с цилиндрическими электродами.
7. Каким образом вводится компенсация изменения электрической емкости уровнемера в рабочих условиях?
8. Для чего используются уравнительные сосуды при измерении уровня жидкостей с помощью дифманометров-уровнемеров?
9. Покажите различные варианты схем подключения дифманометров-уровнемеров при измерении уровня в барабане паровых котлов.
10. Чем отличаются схемы измерения уровней жидкости в емкостях с избыточным или вакуумметрическим давлением и без него?
11. Какой тип уровнемеров может быть использован для измерения уровня сыпучих тел?

Список литературы

1. Автоматические приборы, регуляторы и вычислительные системы. Справочное пособие. Под ред. Кашарского Б.Д. - Л.: Машиностроение, 1976.-488 с.
2. Артемьев Б.Г., Голубев С.М. Справочное пособие для работников метрологических служб. - М.: Изд-во стандартов, 1982. – 280 с.
3. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. - М.: Изд-во стандартов, 1972. – 317 с.
4. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д, Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.
5. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП).Под ред. Кавалерова Г.И. - М.: ЦНИИТЭИ, 1981.– 392 с.
6. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. - Л.: Машиностроение, 1975. – 776 с.
7. Международная практическая температурная шкала 1968г. (МПТШ-68). - М.: Изд-во стандартов, 1976. -27 с.
8. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы: Учебник для вузов. – К.: Вища шк., 1980. – 560 с.
9. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами РД 50-213-80. - М.: Изд-во стандартов, 1982.–320 с.
10. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. - М.: Энергия, 1978. – 704 с.
11. Промышленные приборы и средства автоматизации: Справочник / Под ред. Черенкова В.В. - Л.: Машиностроение, 1987. – 847 с.
12. Справочник проектировщика АСУ ТП. Под ред. Смилянського Г.Л. - М.: Машиностроение, 1983. – 527 с.
13. Температурные измерения. Геращенко О.А., Городов А.Н. и др. – К.: Наукова думка, 1984. – 494 с.

Учебное издание

Контрольно-измерительные приборы в теплотехнических измерениях. Курс лекций для студентов спец. 7.092108 - «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Составитель: Нубарян Сергей Манукович

Редактор: Ю. И. Карпенко

Корректор: З. И. Зайцева

План 2006, поз. 12

Подп. к печати 07.09.2006	Формат 60×84 1/16	Бумага офисная
Печать на ризографе	Условн.- печ. л. 10,5	Уч.– изд. 11
Тираж 100 экз.	Зак. №	

ХНАГХ, 61002, г.Харьков, ул. Революции, д.12

Сектор оперативной полиграфии ИВЦ ХНАГХ
61002, г.Харьков, ул.Революции, д.12